



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**ANALÝZA MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ PLASTOVÝCH
VZORKŮ ZHOTOVENÝCH TECHNOLOGIÍ 3D TISKU**

ANALYSIS OF MECHANICAL PROPERTIES OF PLASTIC SAMPLES PRODUCED BY 3D PRINTING
TECHNOLOGY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Jiroušek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

BRNO 2021

Zadaní diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Jan Jiroušek**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Analýza mechanických vlastností plastových vzorků zhotovených technologií 3D tisku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce se bude zabývat stanovením mechanických vlastností vzorků zhotovených aditivní technologií Fused Deposition Modeling (FDM)/Fused Filament Fabrication (FFF) s využitím dostupných 3D tiskáren. Normalizované vzorky budou vyrobeny z vybraných druhů aditivních materiálů od jednotlivých výrobců a testovány s využitím dostupných zkušebních zařízení. Část ze skupiny vytisknutých vzorků bude před zkoušením vystavena degeneračním vlivům. Práce bude ukončena zhodnocením dosažených výsledků a celkovým doporučením pro uživatele.

Cíle diplomové práce:

Teoretická část – charakteristika polymerních materiálů, rozbor mechanických zkoušek.
Charakteristika aplikovaných aditivních technologií pro 3D tisk.
Experimentální část – výroba vzorků, provedení mechanických zkoušek, zpracování výsledků.
Zhodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené literatury:

PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. CERM, 1. vyd. 246 s. 2009. ISBN 978-80-4-4025-8.
CHUA, C. K., LEONG, K. F., LIM, C. S. Rapid Prototyping Principles and Applications. Hackensack: World Scientific, 2. vyd. 420s. 2005. ISBN 981-238-117-1.
McKEEN, L. W. The Effect of UV Light and Weather on Plastics and Elastomers. Willam, A. 4. vyd. 464 s. 2019. ISBN 978-0-12-816457-0.

GIBSON, I., ROSEN, D. W., STUCKER, B. Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing. New York: Springer, 2010. ISBN 14-419-1120-0.

McKEEN, L. W. Effect of Temperature and Other Factors on Plastics and Elastomers. San Diego: Elsevier Science & Technology Books, 2. vyd. 2000. ISBN 9780815516941.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá stanovením mechanických vlastností vybraných materiálů používaných pro 3D tisk (PLA, PETG, ABS, ASA). Teoretická část práce obsahuje charakteristiku polymerních materiálů, rozebírá mechanické zkoušky a aditivní technologie. V experimentální části byly normalizované vzorky, zhotovené technologií Fused Filament Fabrication, analyzovány pomocí mechanických zkoušek (zkouška tahem a zkouška tvrdosti). Část vzorků byla vystavena vybraným degradačním faktorům, zvolených na základě vypracované teoretické části. Vyhodnocované parametry z mechanických zkoušek (mez pevnosti v tahu, modul pružnosti v tahu, tažnost a tvrdost Shore D) byly statisticky zhodnoceny. V závěru byl posouzen vliv degradačních faktorů na jednotlivé materiály, které byly dále vzájemně porovnány.

Klíčová slova

3D tisk, technologie FFF, stárnutí, zkouška tahem, zkouška tvrdosti

ABSTRACT

The master's thesis deals with the determination of mechanical properties of materials used for 3D printing (PLA, PETG, ABS, ASA). The theoretical part contains characteristics of polymer materials and describes testing of mechanical properties and additive technologies. In the experimental part, the standardized samples produced by the technology Fused Filament Fabrication were analysed using mechanical tests (tensile test and hardness test). Some of the examples were exposed to the selected factors of degradation. Selected parameters from mechanical testing (tensile strength, modulus of elasticity in tension, elongation and Shore hardness) were statistically processed. The conclusion of the thesis evaluates the impact of the factors of degradation on particular materials and compares them subsequently.

Key words

3D print, FFF technology, aging, tensile test, hardness test

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JIROUŠEK, Jan. Analýza mechanických vlastností plastových vzorků zhotovených technologií 3D tisku [online]. Brno, 2021. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132590>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Josef Sedlák.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Analýza mechanických vlastností plastových vzorků zhotovených technologií 3D tisku** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

18. 5. 2021

Datum

Bc. Jan Jiroušek

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji panu doc. Ing. Josefu Sedlákov, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce. Dále děkuji zaměstnancům Katedry strojírenství Fakulty vojenských technologií Univerzity obrany za poskytnutí laboratorního vybavení a odbornou asistenci při realizaci degradačních procesů a mechanických zkoušek. Děkuji také panu Ing. Josefu Bednářovi, Ph.D. za rady v oblasti statistického vyhodnocení naměřených dat. V neposlední řadě děkuji své rodině za umožnění studia na vysoké škole a za její podporu během celého studia.

OBSAH

ABSTRAKT	3
PROHLÁŠENÍ	4
PODĚKOVÁNÍ	5
OBSAH.....	6
ÚVOD.....	9
1 CHARAKTERISTIKA POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ	12
1.1 Struktura polymerních materiálů	12
1.2 Nadmolekulární struktura	13
1.3 Dělení polymerů.....	13
1.4 Degradace polymerů	14
1.4.1 Vliv světelného záření	14
1.4.2 Vliv ozónu	14
1.4.3 Vliv kyslíku	15
1.4.4 Navlhavost a nasákavost.....	15
1.4.5 Vliv chemických činidel.....	15
1.4.6 Vliv biologických činitelů	15
1.4.7 Vliv teploty	16
1.5 Aplikované aditivní materiály.....	16
1.5.1 PLA (Polylactic Acid)	17
1.5.2 ABS (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene)	17
1.5.3 PETG (Polyethylene-Terephthalate-Glycol)	18
1.5.4 ASA (Acrylonitrile-Styrene-Acrylate)	18
2 ROZBOR MECHANICKÝCH ZKOUŠEK MATERIÁLŮ	19
2.1 Zkouška tahem	20
2.1.1 Hookeův zákon.....	21
2.1.2 Materiálové charakteristiky stanovované zkouškou tahem	22
2.2 Zkoušky tvrdosti	24
2.2.1 Zkouška tvrdosti dle Rockwella	24
2.2.2 Zkouška tvrdosti dle Vickerse	25
2.2.3 Zkouška tvrdosti dle Brinella	26
2.2.4 Zkouška tvrdosti metodou Shore.....	27
3 CHARAKTERISTIKA TECHNOLOGIÍ 3D TISKU	28
3.1 Aditivní technologie na bázi pevných materiálů	28
3.1.1 Laminated Object Manufacturing (LOM)	28

3.1.2	Fused Deposition Modeling (FDM) / Fused Filament Fabrication (FFF)	29
3.2	Aditivní technologie na bázi fotopolymerů	31
3.2.1	Stereolithography (SLA)	31
3.2.2	Digital Light Processing (DLP)	31
3.2.3	Solid Ground Cutting (SGC)	32
3.3	Aditivní technologie na bázi práškových materiálů.....	33
3.3.1	Three-Dimensional Printing (3DP)	33
3.3.2	Selective Laser Sintering (SLS)	33
3.3.3	Direct Metal Laser Sintering (DMLS).....	33
4	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	34
4.1	Postup zhotovení vzorků pro mechanické zkoušky	34
4.1.1	Volba tvaru zkušebních vzorků	34
4.1.2	Volba materiálů pro zhotovení zkušebních vzorků	36
4.1.3	Pre-processing, tiskové parametry	36
4.1.4	Použité 3D tiskárny a zhotovení vzorků	37
4.2	Vystavení vzorků degradačním vlivům	37
4.2.1	UV záření.....	37
4.2.2	Kondenzační komora.....	38
4.2.3	Teplotní cykly.....	39
4.2.4	Výdrž na teplotě 60 °C	39
4.2.5	Povětrnostní vlivy.....	40
4.3	Provedení tahové zkoušky	41
4.4	Provedení zkoušky tvrdosti.....	42
5	VYHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ	43
5.1	Statistické vyhodnocení výsledků.....	43
5.2	Vliv UV záření	46
5.3	Vliv umístění vzorků do kondenzační komory	49
5.4	Vliv teplotních cyklů.....	52
5.5	Vliv výdrže na teplotě 60 °C.....	54
5.6	Vliv povětrnostních podmínek.....	57
6	DISKUZE	61
6.1	Zhodnocení jednotlivých degradačních vlivů	61
6.2	Porovnání dosažených výsledků mezi výrobci jednotlivých materiálů	61
6.2.1	Porovnání výsledků mezi výrobci – materiál PLA.....	62
6.2.2	Porovnání výsledků mezi výrobci – materiál PETG	63
6.2.3	Porovnání výsledků mezi výrobci – materiál ABS	64

6.2.4	Porovnání výsledků mezi výrobcí – materiál ASA	66
6.2.5	Hodnocení výsledků výrobců jednotlivých materiálů	67
6.3	Doporučení pro uživatele	67
7	ZÁVĚR	70
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	71
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	75
	SEZNAM PŘÍLOH	77

ÚVOD

Aditivní metody jsou jednou z nejrychleji se vyvíjejících oblastí současnosti. Tyto metody spočívají v postupném kladení materiálu ve vrstvách v požadované geometrii, dokud se nevytvoří finální objekt. Prvotní myšlenkou využití aditivních metod byla rychlá tvorba prototypů bez nutnosti výroby forem, tzv. RP (Rapid Prototyping). Rychlá výroba prototypu umožnila snadné ověření funkčnosti a designu výrobku, zároveň se stala vhodným doplňkem při komunikaci se zákazníkem. Od prototypů se ale aditivní technologie stále více posouvají k tvorbě finálních součástí, např. v tvorbě dílů na míru, v kusové a malosériové výrobě. Velkou výhodou aditivních metod je úspora materiálu, v porovnání s technologií třískového obrábění nevzniká téměř žádný odpadní materiál, což je výhodné z hlediska ekonomického i ekologického. Své uplatnění nachází 3D tisk nejen ve strojírenství, automotive, ale například také v oblasti stavebnictví, umění i medicíny, kde slouží k výrobě kloubních implantátů, zubních náhrad i tisku živých buněk [1].

Vývoj aditivních technologií započal v roce 1980, kdy byl objeven princip technologie SLA (Stereolithography). Postupně došlo k vývoji dalších metod, v roce 1989 si firma Stratatys patentovala v současnosti nejvíce rozšířenou technologii FDM (Fused Deposition Modeling). Technologie FDM, potažmo FFF (Fused Filament Fabrication), zaznamenala velký rozvoj po roce 2004 díky myšlence samo-reprodukovatelných tiskáren v rámci open source projektu RepRap. Po vypršení patentu firmy Stratatys na technologii FDM v roce 2009 se 3D tisk stal finančně dostupnějším nejen pro firmy, ale i pro oblast hobby [2].

Pro možnost využití 3D tisku k tvorbě finálních výrobků je klíčová znalost vlastností materiálů a zároveň toho, jakým způsobem se tyto vlastnosti mění působením degračních vlivů. Tato práce je z toho důvodu zaměřena nejen na stanovení základních mechanických vlastností vzorků v základním stavu, ale také na sledování změn mechanických vlastností vlivem vybraných degračních faktorů.

Experimentální část práce tvoří analýza mechanických vlastností čtyř v současnosti hojně využívaných materiálů pro technologii FFF/FDM a jejich změn vlivem degradace. Jedná se o materiály PLA (Polyactic Acid), PETG (Polyethylene-Terephthalate-Glycol), ABS (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene) a ASA (Acrylonitrile-Styrene-Acrylate), které jsou dále popsány v teoretické části práce. Práce navazuje na následující poznatky prací z oblasti analýzy mechanických vlastností plastů a vlivu degračních faktorů.

Změnu mechanických vlastností materiálu PLA působením teploty 60 °C a prostředí o vlhkosti odstupňované v intervalu 20–95% po dobu 14 dní sleduje studie [3]. Patrný je pokles modulu pružnosti v tahu, přičemž platí, že čím vyšší byla vlhkost prostředí, tím byl tento pokles výraznější: 1,67 % při 60 °C 20% vlhkosti; 3,5 % při 60 °C 65%; 7,5 % při 60 °C 95%. Obdobně došlo také k poklesu meze pevnosti (8,7 % při 60 °C 20%; 11,2 % při 60 °C 65%; 63 % při 60 °C 95%). Naopak tažnost s přibývajícím vlhkostí roste (nárůst 1,4 % při 60 °C 20% vlhkosti; 14,3 % při 60 °C 80%) [3].

Vliv působení vlhkosti popisuje také článek [4], který pozoruje změnu mechanických vlastností vzorků PLA působením prostředí 55 °C a 95% vlhkosti. Mez pevnosti v tahu v tomto případě s rostoucím časem klesá (přibližně o 9,5 % po 10 dnech, o 29 % po 32 dnech). V případě modulu pružnosti v tahu je pokles mírnější (zhruba o 5 % po 10 dnech, o 12 % po 32 dnech) [4].

Vliv působení UV záření a teploty 60 °C po dobu 15, 35 a 65 hodin na mechanické vlastnosti materiálu PLA popisuje článek [5], ze kterého vyplývá pokles modulu pružnosti v tahu (o 18,7 % po 35 h) a meze pevnosti (o 29,7 % po 35 h) vlivem teploty a expozice UV záření [5]. V porovnání s výše zmíněným působením prostředí o teplotě 60 °C a 20% vlhkosti je patrný výraznější pokles vlastností za kratší dobu vlivem působení UV záření.

U materiálu PETG lze naopak působením zvýšených teplot pod teplotou skelného přechodu pozorovat zlepšení mechanických vlastností [6]. Pro teploty v intervalu 45–75 °C je patrný nárůst meze pevnosti v tahu, který je tím výraznější, čím delší je doba experimentu. Například pro teplotu 75 °C došlo po 30 h ke zvýšení meze pevnosti materiálu přibližně o 10,5 % oproti stavu po 1 h stárnutí [6].

Trend zlepšení mechanických vlastností PETG potvrzuje i výzkum, při kterém byly vzorky vystaveny působení venkovního prostředí [7]. Po 96 dnech došlo ke zvýšení meze kluzu o 13 %, obdobně modul pružnosti v tahu se po 96 dnech navýšil, a to přibližně o 3 %. První pokles meze kluzu oproti referenční hodnotě byl zaznamenán až po 274 dnech [7].

Rovněž u materiálu ABS a ASA dochází za zvýšených teplot pod teplotou skelného přechodu ke zlepšení mechanických vlastností, což potvrzují výsledky studie [8]. Tištěné vzorky ABS a ASA byly vystaveny tepelným cyklům v intervalu teplot 22–60 °C v celkové době 240 h a otestovány třibodovým ohybem. Z výsledků je patrné navýšení pevnosti oproti vzorkům v základním stavu v případě ASA zhruba o 33 % a u materiálu ABS o 25 % [8].

Ovlivněním mechanických vlastností materiálu ABS vlivem působení vlhkého prostředí se zabírá článek [9]. Z jeho závěru plyne, že po ponoření vzorků do vody ohřáté na 50 °C na 140 dní, došlo ke snížení modulu pevnosti v tahu o více než 30 %, naopak tažnost materiálu se zvýšila o 16 %. Hodnotu meze pevnosti působení vlhkého prostředí značně neovlivnilo [9].

Vliv UV záření na materiál ABS lze predikovat na základě studie [10]. Extrudované vzorky ABS byly umístěny do UV komory a vystaveny UV záření po různě dlouhé časové úseky. 27,2 h expozice v této UV komoře má odhadem představovat roční radiaci UV záření ve venkovních podmínkách. Modul pružnosti v tahu u první sady vzorků odebraných po 50 h expozice klesl (přibližně o 10 %), po delších dobách expozice byl pokles oproti původní hodnotě nižší – o 8 % po 120 h; o 6 % po 430 h. U meze pevnosti byl naopak pozorován pokles tím výraznější, čím delší byla doba expozice. Konkrétně došlo ke snížení pevnosti o 3,3 % po 50 h; o 46,3 % po 120 h; o 71,4 % po 430 h [10].

Studie [11] se zabývá změnou vlastností materiálu ABS vlivem střídajícího se působení UV záření (UV a 60 °C) s prostředím se zvýšenou 100% vlhkostí a 50 °C. Dále je obsahem této studie porovnání vzorků vytištěných čistě z materiálu ABS a vzorků z ABS s využitím krycí vrstvy z materiálu ASA, z čehož lze odhadovat také odolnost materiálu ASA oproti výše zmíněným podmínkám. Z výsledků plyne, že zatímco u ABS vzorků došlo ke snížení meze pevnosti o 5,5 % po 1200 h, u vzorků kombinace ABS+ASA nedošlo k patrné změně. Došlo také k poklesu tažnosti, u ABS+ASA o 5,1 %, u samotného ABS byl pokles výraznější: 32,1 %. U hodnot modulu pružnosti v tahu nedošlo ani v jednom případě k výraznějším změnám [11].

Vliv teplotních cyklů FT (*Freeze-Thaw cycles* – teplotní cykly mraz/pokojová (zvýšená) teplota) na v této práci zvolené materiály lze pouze odhadovat na základě chování jiných druhů polymerů. Vliv cyklování FT na FDM 3D tisknuté vzorky ze směsi polyetherimidu a polykarbonátu popisuje studie [12]. Cykly probíhaly mezi -20 °C a 60 °C, celkem bylo provedeno 300 cyklů. FT cyklování způsobilo pokles meze pevnosti přibližně o 21 %, modul pružnosti v tahu klesl cca o 17 % [12].

Pokles meze pevnosti byl pozorován i u epoxidové pryskyřice DGEBA vystavené 210 cyklům -5 °C/40 °C – konkrétně o 8,5 %. Klesla také tažnost, a to o 24 %. Naopak modul pružnosti v tahu v tomto případě vzrostl o 5,5 % [13].

Obdobný vliv FT cyklů byl pozorován u kompozitů HDPE (polyethylen s vysokou hustotou) a PP (polypropylen) s dřevitou moučkou. Např. u kompozitu 50 % PP a 50 % dřevité moučky byl pozorován pokles meze kluzu o téměř 60 % a zároveň pokles modulu pružnosti v tahu o 19 % po podstoupení 12 FT cyklů -27 °C / 21°C [14].

1 CHARAKTERISTIKA POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ

Polymerní materiály mají velkou rozmanitost vlastností, které podmiňují způsob jejich použití. Právě variabilita vlastností, dostupnost surovin a snadné zpracování vedlo k jejich rozvoji a k nahrazování kovových či jiných materiálů polymery [15, 16].

1.1 Struktura polymerních materiálů

Polymer je tvořen makromolekulami, které vznikají spojováním – řetězením – nízkomolekulárních látek, takzvaných monomerů. Řetězení probíhá chemickým postupem zvaným polyreakce. Polyreakce může být provedena třemi různými způsoby: polymerací, polykondenzací nebo polyadicí. Pokud polymer vzniká z jednoho typu monomeru, nazývá se homopolymer. Je-li polymer tvořen dvěma nebo více odlišnými monomery, je označován jako kopolymer [16, 17, 18, 19].

Polymerace je reakce molekul monomeru, které se spojují do řetězovité molekuly polymeru. Radikálová polymerace spočívá v rozštěpení vazby v molekule monomeru radikálem – vysoce reaktivní částicí. Iniciace se provádí např. tepelnou energií, peroxidy (změnou pH) či UV zářením. Následný růst řetězce se nazývá propagace, při níž dochází k tvorbě stále objemnějších radikálů. Růst končí terminací – spojením dvou radikálů. Iontovou polymeraci lze využít pro polarizované monomery a spočívá v reakci aniontu/kationtu, který vzniká rozštěpením molekuly činidla, s monomerem. Záporný/kladný náboj se po reakci přesouvá na atom uhlíku a dochází k řetězení. Děj končí spotřebováním monomeru, nebo přidáním vody či alkoholu. Příklad průběhu radikálové a iontové polymerace obsahuje tab. 1.1 [18, 19].

Tab. 1.1 Příklady průběhu radikálové a iontové polymerace [18].

Krok	Radikálová polymerace	Iontová polymerace (aniontová)
Iniciace	$A-B \rightarrow A^{\bullet} + B^{\bullet}$	$A-B \rightarrow A^{+} + B^{-}$
Propagace	$A^{\bullet} + CH_2=CH_2 \rightarrow A-CH_2-CH_2^{\bullet}$ $B^{\bullet} + CH_2=CH_2 \rightarrow B-CH_2-CH_2^{\bullet}$	$B^{-} + CH_2=CH_2 \rightarrow B-CH_2-C^{\ominus}H_2$
Terminace	$A-CH_2-CH_2^{\bullet} + B-CH_2-CH_2^{\bullet}$ $\rightarrow A-(CH_2)_4-B$	$B-CH_2-C^{\ominus}H_2 + H-OH \rightarrow B-CH_2-CH_3 + OH^{-}$

Polykondenzace je stupňovitá reakce, při níž vznikají vedle polymerního řetězce také vedlejší nízkomolekulární látky (např. voda, chlorovodík). Reakce probíhá spojením dvou monomerů, z nichž každý musí obsahovat alespoň dvě funkční skupiny (např. -OH), a odštěpením vedlejšího produktu. Vzniklý polymer má odlišné chemické složení oproti výchozím sloučeninám, na rozdíl od polymerace, při které se chemické složení nemění. Výhodou polykondenzace je možnost přerušení v libovolném stádiu [18, 19, 20].

Posledním způsobem polyreakce je polyadice. Stejně jako při polykondenzaci dochází k reakci dvou monomerů, které ale obsahují rozdílnou funkční skupinu. Při polyadici nedochází ke vzniku vedlejšího produktu, protože vodíkový atom se přesouvá z jedné funkční skupiny na jinou [18, 19].

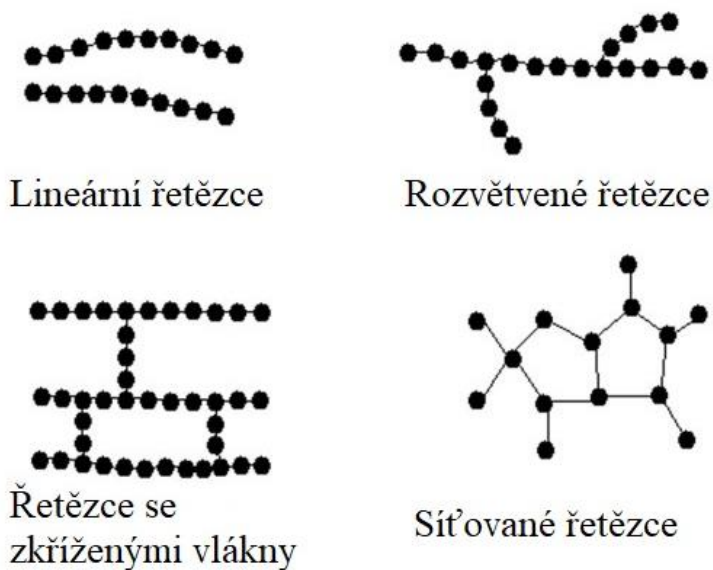
Polymery lze dělit dle uspořádání struktury (viz obr. 1.1) monomerů na [16, 19, 20]:

- lineární řetězce – monomery tvoří jednoduchý hlavní řetězec,
- rozvětvené řetězce – z hlavních řetězců vystupují postranní větve,
- řetězce se zkříženými články – sousední řetězce jsou propojeny články,
- síťované řetězce – sousední řetězce jsou propojeny v různých místech.

1.2 Nadmolekulární struktura

Při ochlazování taveniny mohou některé typy polymerů nabývat pravidelného uspořádání a jsou tedy schopny částečně krystalizovat. Dle uspořádání lze polymery rozdělit na amorfni a semikrystalické [17, 20].

Pokud makromolekuly nemají schopnost samovolného uspořádání a řetězce i po ztuhnutí zůstávají v nepravidelném nahodilém stavu, nazývají se polymery amorfni. Naopak u semikrystalických polymerů dochází k tvorbě oblastí, ve kterých makromolekuly tvoří uspořádanou strukturu a mezi nimiž se vyskytuje neuspořádaná amorfni struktura. Podíl krystalického obsahu závisí na struktuře makromolekuly a na podmínkách zpracování (rychlost ochlazování, přísady) [17, 19, 20].



Obr. 1.1 Dělení polymerů dle uspořádání řetězců [21].

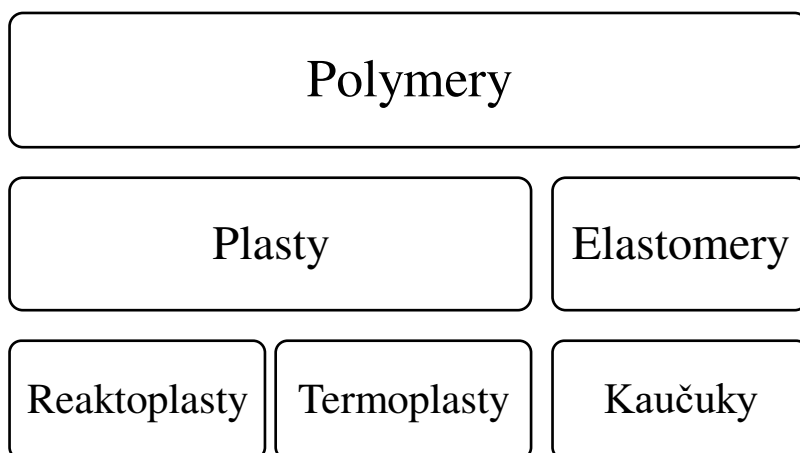
1.3 Dělení polymerů

Polymery lze dělit nejen dle uspořádání řetězců či nadmolekulární struktury, ale i podle dalších různých hledisek. Například dle chování v elektrickém poli (polární a nepolární) nebo dle chemického složení makromolekul (organické a anorganické). Nejpoužívanějším dělením je dělení polymerů na elastomery a plasty, které se dále dělí na termoplasty a reaktoplasty dle chování při ohřevu. Toto dělení znázorňuje obr. 1.2 [15, 16, 20].

Elastomer je vysoce elastický polymer, který snadno podléhá elastické deformaci. Hlavní skupinou elastomerů jsou kaučuky, ze kterých se vyrábí pryže [15, 16, 20].

Termoplasty je možné ohřevem opakovaně převést do stavu taveniny a zchladnutím nechat ztuhnout. Molekulární struktura termoplastů se při zpracování nemění, čehož lze využít při recyklaci termoplastů [15, 16, 20].

Reaktoplasty při zpracování procházejí změnou struktury – vytvrzováním. Při zvýšených teplotách neměknou a v porovnání s termoplasty jsou pevnější, tvrdší a mají vyšší rozměrovou stálost [15, 16, 20].



Obr. 1.2 Rozdělení polymerů – dle [15].

1.4 Degradace polymerů

Degradace polymerů je nežádoucí změna chemického složení, která může nastat jak při používání výrobku, tak při jeho výrobě. V důsledku působení vnějšího prostředí dochází ke stárnutí polymerů, které se obvykle projeví změnou barvy, lesku či průhlednosti a poklesem mechanických vlastností. Nejdůležitější vliv na degradaci polymerů má světelné záření, kyslík, ozón, voda, teplota a dále chemická činidla či mikroorganismy [15, 19].

1.4.1 Vliv světelného záření

Největší vliv na stárnutí polymerů má UV záření, které je součástí slunečního světla. Působením ultrafialového záření dochází k absorbování energie makromolekulou, což vede k porušení vazeb v řetězci makromolekuly. Ta se rozpadá na menší celky, které pak snadno reagují se vzdušným kyslíkem. Tento děj se nazývá fotooxidace. Fotooxidace začíná na povrchu, ale postupně se dostává do větší hloubky. Kromě štěpení může záření vyvolat změny ve struktuře, které vedou ke větvení a síťování makromolekul a tím ke zkřehnutí materiálu. Pro zvýšení odolnosti vůči UV záření se do polymerů přidávají stabilizátory, které záření absorbují [15, 17, 19, 22].

1.4.2 Vliv ozónu

Na plasty je vliv ozónu nevýznamný, negativní vliv však může mít na elastomery. Reaguje s povrchem pryžového výrobku a vytváří tvrdou a křehkou vrstvu ozonidu. Praskáním a vytvářením nových povrchových vrstev dochází k mechanickému porušení výrobku. Vliv ozónu snižuje nasycenost makromolekulárního řetězce, tedy počet dvojných vazeb v řetězci – kaučuky s nasyceným hlavním řetězcem jsou vůči ozonu odolnější [15, 19, 22].

1.4.3 Vliv kyslíku

Vliv vzdušného kyslíku za normálních podmínek není značný, většina polymerů je vůči němu stálá. Ovšem v kombinaci s působením světelného záření, tepla či mechanického zatížení může dojít k oxidačním reakcím, které mají nepříznivý vliv na kvalitu polymeru. Odolnost polymeru proti kyslíku ovlivňuje chemické složení, dále difúze a rozpustnost kyslíku v polymeru [15, 19].

1.4.4 Navlhavost a nasákavost

Přijímání vody polymerem z vlhkého prostředí se nazývá navlhavost, ponořením do vody dochází k nasakování. Absorpce vody má vliv na rozměry plastové součásti, které se zvětšují úměrně absorbovanému objemu vody. Ovlivněny jsou také mechanické vlastnosti výrobku – snižuje se pevnost, modul pružnosti a tvrdost, naopak tažnost a houževnatost roste. Tyto změny jsou vratné, úbytkem vody se opět odstraní. Voda ale může způsobit i vyplavování aditiv či nízkomolekulárních podílů a tím trvale mění vlastnosti materiálu. S přibývajícím objemem vody v polymeru také roste vzdálenost mezi makromolekulami, což může vést k urychlení ostatních degradačních procesů [17, 19].

Navlhavost závisí na složení polymeru a je ovlivněna přítomností elektronegativních prvků v makromolekule (např. kyslík, dusík nebo chlor), která navlhavost polymeru zvyšuje. Naopak polymery s makromolekulami tvořenými atomy uhlíku a vodíku mají navlhavost nižší. Absorpci vody lze také ovlivnit přidáním aditiv, organická plniva navlhavost zvyšují, anorganická naopak. Pro hodnocení vlastností výrobku se využívá tzv. kondicionování dílů, při kterém je výrobek uveden do rovnovážného stavu vzhledem k teplotě a vlhkosti prostředí, ve kterém bude používán [17, 19].

1.4.5 Vliv chemických činidel

Při působení chemikálií na polymery nastávají dvě varianty. V prvním případě chemikálie není absorbována a nezpůsobí tak žádné změny vlastností polymeru. Ve druhém případě dochází k absorpci chemické látky, která může způsobit fyzikální nebo chemické změny polymeru [17, 19].

Fyzikální změny se projevují bobtnáním, které může vést až k rozpuštění polymeru v chemikálii. Tyto změny jsou vratné a po vysušení nabývá polymer původních vlastností. Odolnost polymerů vůči rozpouštědlům závisí na jejich polaritě – nepolární polymery se rozpouštějí v nepolárních rozpouštědlech a odolávají polárním rozpouštědlům a naopak [17, 19].

Chemické změny se projevují chemickou reakcí látky s polymerem. Takovéto změny jsou nevratné a trvale mění vlastnosti polymeru. Odolnost proti působení kyselin, zásad a oxidačních látek je nižší u polárních polymerů. Odolnost polymerů vůči chemikáliím roste s podílem krystalické struktury, k poklesu odolnosti naopak dochází při současném působení mechanického namáhání, kdy může dojít ke korozi za napětí [17, 19].

1.4.6 Vliv biologických činitelů

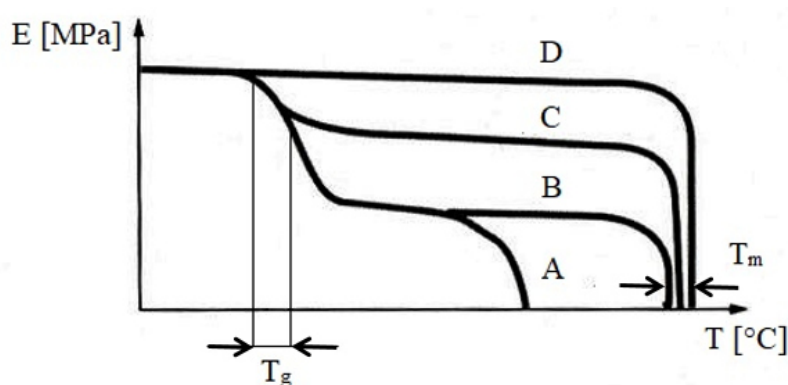
Biologická koroze je napadení materiálu mikroorganismy. Polymer pro ně může být zdrojem uhlíku, dusíku a dalších prvků. Enzymy produkované mikroorganismy způsobují naleptávání povrchu výrobků. Náchylné na biologickou korozi jsou zejména polymery s organickými plnivy (dřevitá moučka) nebo změkčovadly [15, 19].

1.4.7 Vliv teploty

Rostoucí teplota může polymer ovlivnit dvěma způsoby. Může dojít k měknutí polymeru a v případě dostatečně vysokých teplot i ke zkapalnění, nebo dochází ke změně struktury polymeru – štěpení makromolekul, destrukci nebo síťování. Teplotní degradace závisí na době, mechanickém namáhání a okolním prostředí. Zvýšená teplota urychluje degradační procesy. Maximální teplota z hlediska použitelnosti je stanovována jako teplota, při které si plast zachová min. 50 % určité vlastnosti (např. tažnosti) po 10 000 hodinách expozice [15, 17, 23].

Vliv teploty na mechanické vlastnosti určuje mimo jiné i podíl krystalické fáze, jak znázorňuje obr. 1.3. U amorfních plastů se lze orientovat podle teploty skelného přechodu a u semikrystalických plastů dle teploty tání krystalické fáze [15, 17].

Odolnost vůči nízkým teplotám závisí na ostatních podmínkách namáhání. S klesající teplotou polymer křehne a roste jeho tuhost, což se projevuje především u pryží [19, 23].



E – modul pružnosti v tahu

T – teplota

T_g – rozmezí skelného přechodu

T_m – rozmezí tání krystalického podílu

A – amorfní polymery

B – polymery s nízkým obsahem krystalického podílu

C – polymery se středním obsahem krystalického podílu

D – polymery s vysokým obsahem krystalického podílu

Obr. 1.3 Závislost vlastností amorfních a částečně krystalických polymerů na teplotě [17].

1.5 Aplikované aditivní materiály

Materiály pro aditivní technologii FFF/FDM jsou ve formě drátu neboli filamentu, obvykle navinutého na cívce. Nejčastěji se jedná o plastové materiály, existují však kompozity s příměsí kovů nebo filamenty na bázi dřeva. Pro správnou volbu materiálu jsou důležité jeho vlastnosti, a to nejen mechanické vlastnosti, ale také vlastnosti ovlivňující obtížnost výroby, především teplotní roztažnost. Přehled vybraných materiálů používaných pro technologii FFF/FDM uvádí tab. 1.2 [24, 25, 26].

V podkapitole jsou dále popsány materiály použité v rámci experimentální části.

Tab. 1.2 Materiály používané pro technologii FFF/FDM [24, 25, 26]:

Materiál	Zkratka
Polylactic Acid (kyselina polymléčná)	PLA
Polyethylene-Terephthalate-Glycol	PETG
Acrylonitrile-Butadiene-Styrene	ABS
Acrylonitrile-Styrene-Acrylate	ASA
Nylon (Polyamide)	PA
Polypropylene	PP
Thermoplastic Polyurethane	TPU
Thermoplastic Elastomer	TPE
Polyvinyl Alcohol	PVA
High-Impact Polystyrene	HIPS
Polycarbonate	PC

1.5.1 PLA (Polyactic Acid)

PLA je termoplast z cukrové třtiny, bramborového nebo kukuřičného škrobu. Výhodou PLA je, že se jedná o materiál vyráběný z obnovitelných zdrojů, který je biologicky odbouratelný, na rozdíl od dalších termoplastů vyráběných z ropy. Další výhodou PLA je snadný tisk, díky nízké teplotě tání a nízké teplotní roztažnosti (viz tab. 1.3) – nedochází ke smrštění výtisku. Lze ho tedy použít jak pro větší výtisky, tak pro detailní modely. Nevýhodou PLA je nízká teplota skelného přechodu, kvůli níž není vhodný k použití za vyšších teplot ani ke strojnímu opracování (bez chlazení) [27, 28, 29, 30].

1.5.2 ABS (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene)

ABS je amorfni termoplastický kopolymer, který byl jedním z prvních materiálů používaných pro technologii FFF/FDM. Jeho výhodou jsou dobré mechanické vlastnosti a odolnost vůči vysokým teplotám (tab. 1.3). ABS je rozpustný v acetonu, který tak lze použít pro jeho lepení nebo pro vyhlazení vrstev. Nevýhodou materiálu ABS je nízká odolnost vůči UV záření a také velké smrštění vlivem teplotní roztažnosti, kvůli němuž není ABS vhodný pro tisk rozměrnějších součástí. Pro snížení smrštění je při jeho tisku vhodné využít vyhřívané komory (FDM). Při tisku ABS se uvolňuje styren, což vytváří nepříjemný zápach, proto je vhodné ho zpracovávat ve větrané místnosti [27, 30, 31].

1.5.3 PETG (Polyethylene-Terephthalate-Glycol)

Jedná se o termoplast, který je úpravou jednoho z nejpoužívanějších plastů PET (Polyethylene-Terephthalate). Úprava spočívá v přidání modifikovaného glykolu během polymerace, čímž dochází ke zvýšení houževnatosti materiálu. Jak je patrné z tab. 1.3, výhodou PETG jsou jeho vlastnosti – vyšší mechanické vlastnosti v porovnání s ABS je pružnější, lepší teplotní odolnost než PLA. Další výhodou v porovnání s ABS je nižší teplotní roztažnost, PETG tak lze využít i pro tisk větších objektů [27, 30, 31].

1.5.4 ASA (Acrylonitrile-Styrene-Acrylate)

Materiál ASA postupně nahrazuje materiál ABS. Jedná se o amorfni termoplast, který má podobné vlastnosti jako ABS (viz tab. 1.3), ale jeho výhodou je menší smrštění a vyšší odolnost vůči UV záření. ASA je vhodný materiál pro aplikace, u kterých je kladen důraz na vzhled, protože nedochází k jeho žloutnutí při vystavení UV záření. Obdobně jako u ABS se při tisku ASA uvolňuje škodlivý zápach, proto je vhodné jej tisknout ve větrané místnosti [27, 30, 32].

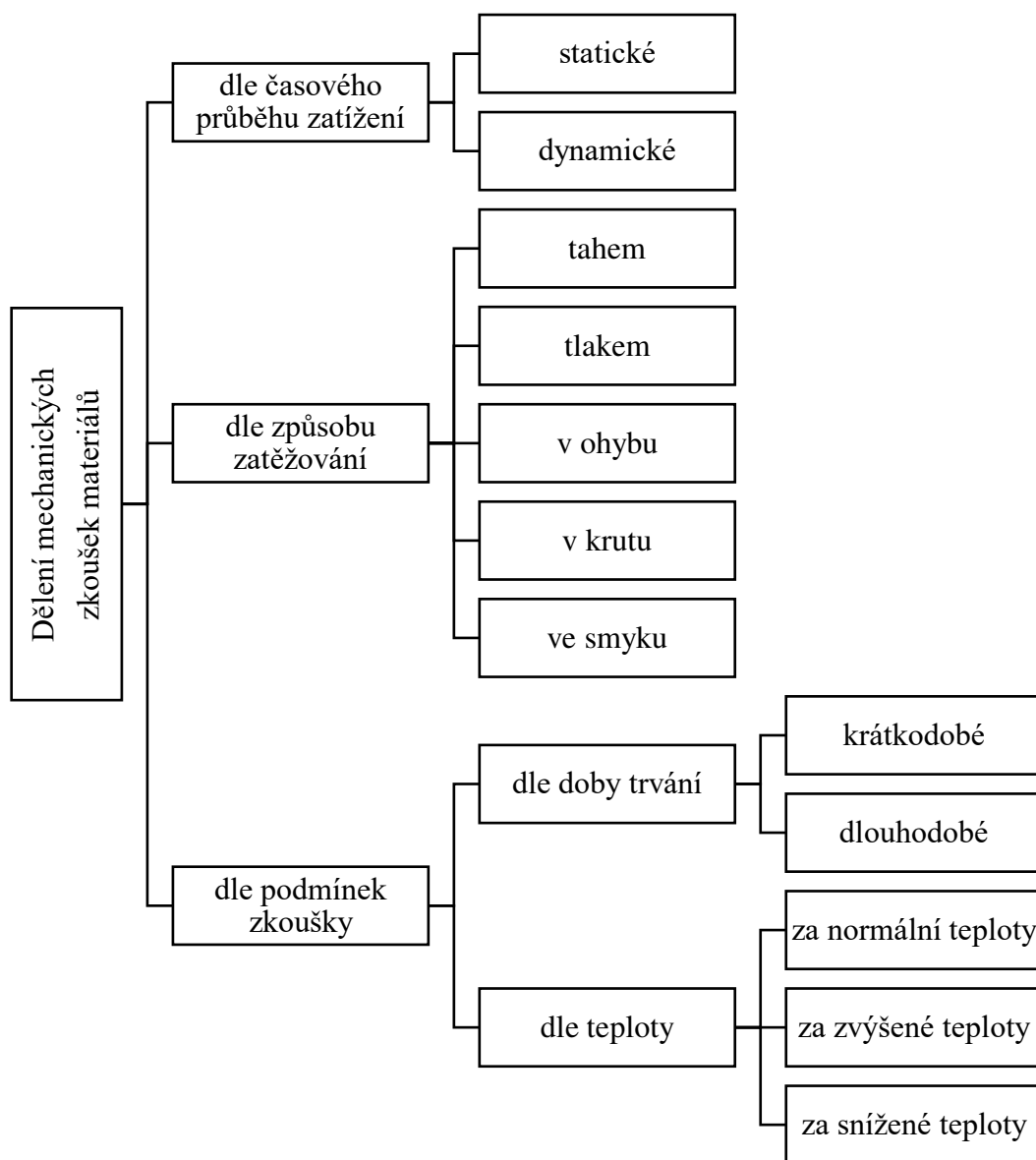
Tab. 1.3 Vybrané vlastnosti aplikovaných aditivních materiálů [33, 34, 35]:

		Materiál			
Veličina	Jednotka	PLA	ABS	PETG	ASA
Pevnost v tahu	[MPa]	60	40	53	55
Rázová houževnatost Charpy	[kJ/m ²]	16,5	28	52	34,5
Teplota trysky	[°C]	210-220	240-255	230-250	255-265
Součinitel teplotní roztažnosti	$\left[\frac{\mu m}{m} K^{-1}\right]$	68	90	60	110
Teplota skelného přechodu	[°C]	60	100	81	110

2 ROZBOR MECHANICKÝCH ZKOUŠEK MATERIÁLŮ

Zkoušení materiálu slouží k vyjádření mechanických vlastností číselnou hodnotou – materiálovou charakteristiku. Znalost mechanických vlastností materiálu je klíčová pro správný výběr materiálu pro konkrétní aplikaci. K určení jednotlivých charakteristik se z materiálu vyrobí zkušební těleso normalizovaného tvaru, které se při zkoušce vystaví vnějšímu zatížení. Výsledkem zkoušky je určení vlivu vnějšího zatížení na zkušební těleso. Zkoušky lze dělit podle různých hledisek, nejčastější dělení je dle způsobu zatěžování, dle časového průběhu zatížení a fyzikálních podmínek zkoušky. Základní dělení mechanických zkoušek materiálů zobrazuje obr. 2.1 [36, 37, 38].

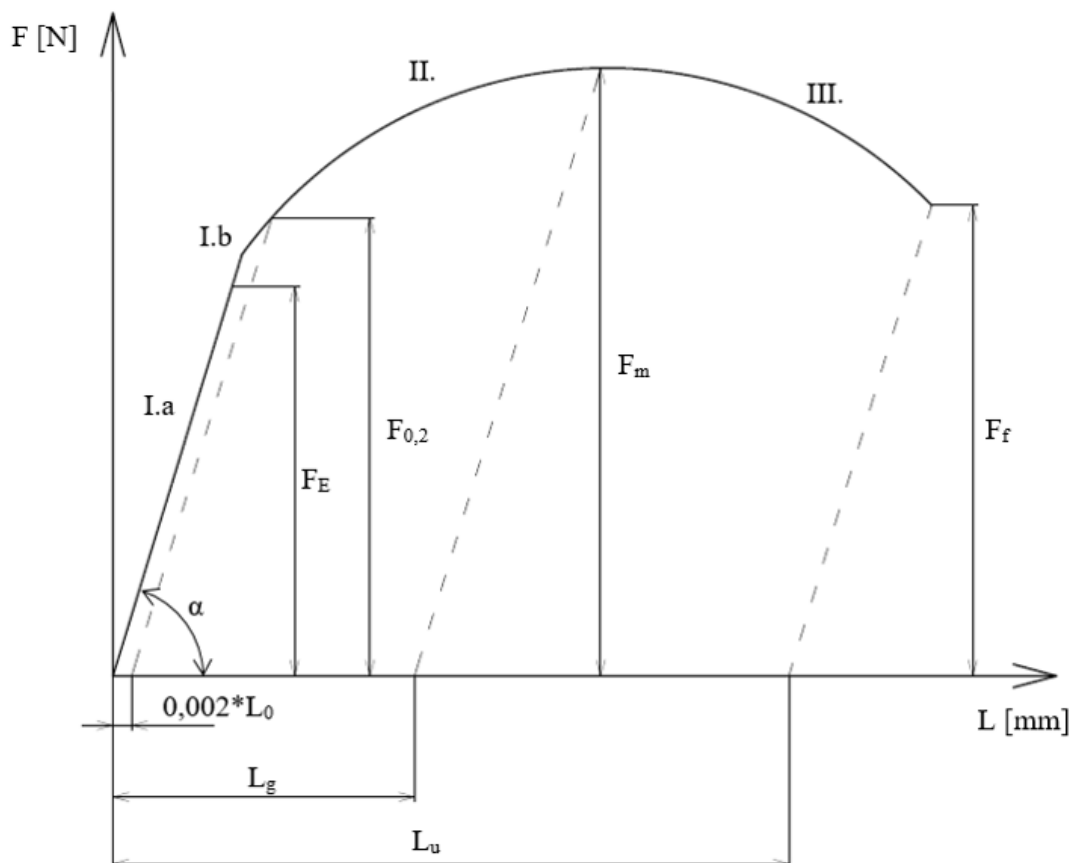
Dále budou rozebrány mechanické zkoušky aplikované v experimentální části.



Obr. 2.1 Dělení mechanických zkoušek materiálů – dle [36, 37, 38].

2.1 Zkouška tahem

Zkouška tahem je základní mechanickou zkouškou k hodnocení pevnosti a plasticity materiálu. Zkušební těleso jednoduchého tvaru, kruhového, nebo obdélníkového průřezu, se upne do čelistí a zatěžuje se konstantní rychlostí zvyšující se zátěžnou silou až do lomu. Zkouška stanovuje závislost zatížení – prodloužení tyče. Během zkoušky se zaznamenává pracovní diagram (obr. 2.2) [36, 37, 38, 39].



Obr. 2.2 Pracovní diagram tahové zkoušky – dle [36, 39].

Během tahové zkoušky prochází materiál čtyřmi úseky [36, 39, 40]:

- V oblasti I.a platí Hookeův zákon (viz vztah 2.5), materiál se deformuje elasticky a platí lineární závislost mezi zatížením a deformací. Po odlehčení se zkušební tyč vrátí do původního stavu. Oblast končí mezí úměrnosti F_E .
- V oblasti I.b se materiál deformuje elasticky, ale závislost mezi zatížením a deformací není lineární. Oblast ukončuje mez kluzu $F_{0,2}$.
- V oblasti II. dochází k plastické deformaci materiálu, ke změně tvaru dochází v celé délce vzorku. Oblast končí dosažením největšího naměřeného zatížení během zkoušky, mezí pevnosti F_m .
- V oblasti III. klesá zatěžující síla a dochází ke vzniku krčku. K další deformaci dochází pouze v oblasti krčku, kde vlivem zmenšujícího se příčného průřezu roste skutečné napětí, přestože zatěžující síla klesá. Oblast i zkouška je ukončena lomem vzorku.

Pracovní diagram se pro možnost vzájemného porovnání jednotlivých materiálů přepočítává na smluvní diagram napětí–deformace. Označení smluvní diagram zohledňuje vyhodnocení zkoušky pro daný původní průřez a délku zkušební tělesa (S_0 a L_0). Přepočet na smluvní diagram se provádí dle vztahů (2.1) a (2.2) [36, 39].

$$R = \frac{F}{S_0} \quad [MPa] \quad (2.1)$$

kde: R [MPa] – smluvní napětí,
 F [N] – zatěžující síla,
 S_0 [mm²] – počáteční plocha průřezu zkušební tělesa.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad [-] \quad (2.2)$$

kde: ε [-] – relativní prodloužení,
 L [mm] – okamžitá délka zkušební tyče,
 L_0 [mm] – počáteční délka,
 ΔL [mm] – prodloužení měřené délky.

Skutečný diagram průběh napětí se liší z důvodu tvorby krčku a růstu napětí vlivem zmenšujícího se příčného průřezu. Skutečný tahový diagram se stanovuje dle vztahů (2.3) a (2.4). Rozdílnost smluvního a skutečného průběhu napětí zobrazuje obr. 2.3 [36, 39].

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad [MPa] \quad (2.3)$$

kde: σ [MPa] – skutečné napětí,
 F [N] – zatěžující síla,
 S [mm²] – okamžitá plocha průřezu zkušební tělesa.

$$\varphi = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) \quad [-] \quad (2.4)$$

kde: φ [-] – okamžité prodloužení,
 L [mm] – okamžitá délka zkušební tyče,
 L_0 [mm] – počáteční délka.

2.1.1 Hookeův zákon

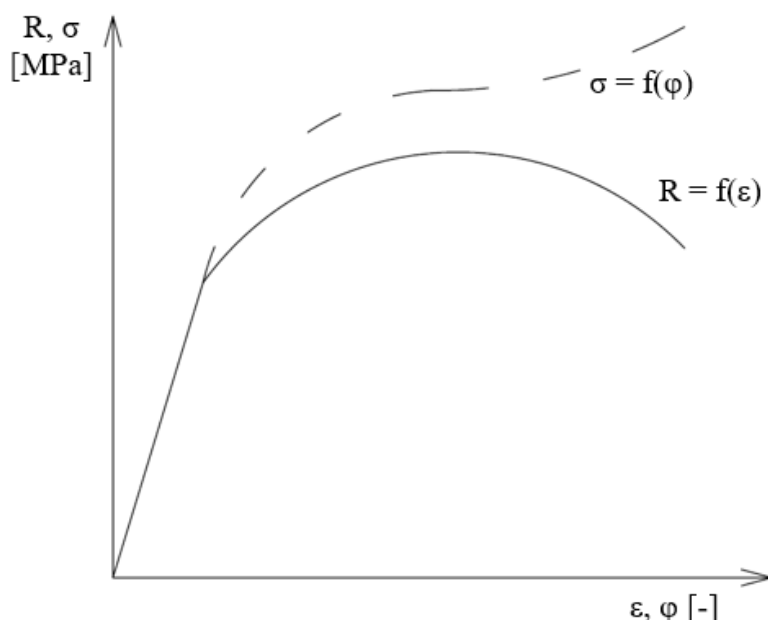
V oblasti I. dle obr. 2.2 probíhá deformace materiálu elasticky a platí v ní lineární závislost mezi zatížením a deformací. Tuto závislost popisuje Hookeův zákon – vztah (2.5). Směrnice přímky je dána modulem pružnosti v tahu dle vztahu (2.6) [36, 39].

$$R = E \cdot \varepsilon \quad [MPa] \quad (2.5)$$

kde: R [MPa] – smluvní napětí,
 ε [-] – relativní prodloužení,
 E [MPa] – modul pružnosti v tahu.

$$E = \tan(\alpha) \quad [MPa] \quad (2.6)$$

kde: E [MPa] – modul pružnosti v tahu,
 α [°] – směrnice přímky dle Hookeova zákona (viz obr. 2.2).



Obr. 2.3 Porovnání smluvního a skutečného tahového diagramu – dle [39].

2.1.2 Materiálové charakteristiky stanovované zkouškou tahem

Ze zkoušky tahem se stanovují následující napětíové a deformační charakteristiky.

Mez kluzu R_e

Mezí kluzu se označuje napětí, při kterém dochází ke vzniku první plastické deformace. Do hodnoty meze kluzu platí Hookeův zákon. Mez kluzu je dána vztahem (2.7) a určuje odolnost materiálu vůči plastické deformaci, proto se využívá při konstrukčních výpočtech [36, 39].

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad [MPa] \quad (2.7)$$

kde: R_e [MPa] – mez kluzu,
 F_e [N] – síla odpovídající mezi kluzu,
 S_0 [mm²] – počáteční plocha průřezu zkušební tělesa.

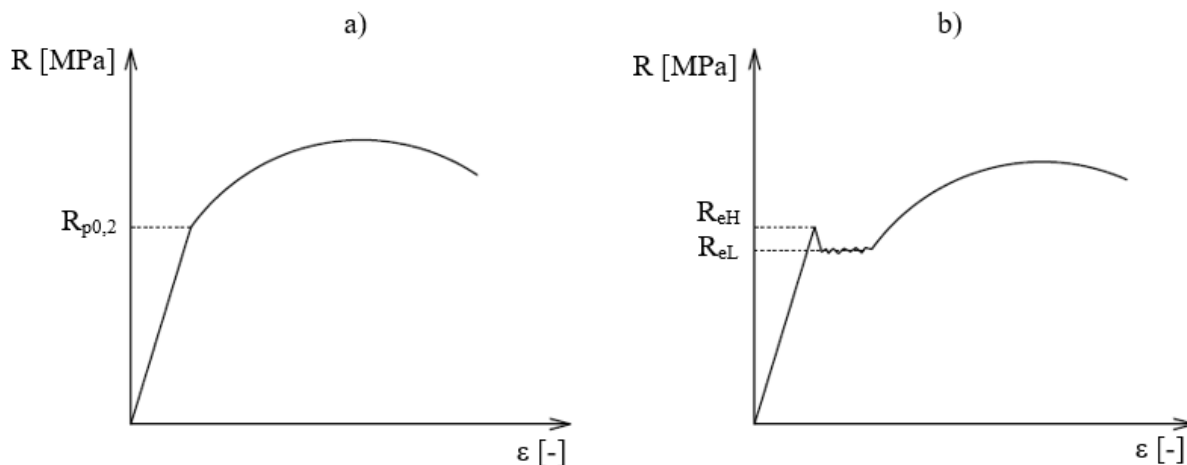
V některých případech je proces vzniku plastické deformace heterogenní (např. u nízkouhlíkových ocelí), proto se stanovují také hodnoty horní meze kluzu R_{eH} a dolní meze kluzu R_{eL} . Horní mez kluzu je napětí odpovídající prvnímu poklesu zatížení, dolní mez kluzu je nejnižší napětí v průběhu plastické deformace [36, 39].

Smluvní mez kluzu R_p

Smluvní mez kluzu se zavádí z toho důvodu, že některé materiály nevykazují výraznou mez kluzu R_e . Průběh tahové zkoušky pro materiály bez výrazné meze kluzu a s výraznou mezí kluzu zobrazuje obr 2.4. Smluvní mez kluzu je napětí, které vyvolá danou plastickou deformaci (obvykle. $\varepsilon = 0,002$, poté se napětí označuje $R_{p0,2}$). Určuje se dle vztahu (2.8) [36, 39].

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} \quad [MPa] \quad (2.8)$$

kde: $R_{p0,2}$ [MPa] – smluvní mez kluzu,
 $F_{p0,2}$ [N] – zatížení, které vyvolá deformaci $\varepsilon = 0,002$,
 S_0 [mm²] – počáteční plocha průřezu zkušební tělesa.



Obr. 2.4 Průběh tahové zkoušky materiálu – dle [36, 39].

a) bez výrazné meze kluzu b) s výraznou mezí kluzu.

Mez pevnosti v tahu R_m

Mez pevnosti je nejvyšší napětí, při kterém ještě nedochází k porušení materiálu. Po dosažení meze pevnosti dochází k tvorbě krčku a poklesu zatěžující síly, ačkoliv reálné napětí v oblasti krčku roste. Mez pevnosti se stanovuje podle vztahu (2.9) [36, 37, 39].

Hodnota meze pevnosti slouží k základní klasifikaci materiálů, pro konstrukční účely se využívá spíše hodnoty meze kluzu, protože mez pevnosti platí pouze pro podmínku jednoosé napjatosti [21].

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad [MPa] \quad (2.9)$$

kde: R_m [MPa] – mez pevnosti,
 F_m [N] – maximální síla dosažená při zkoušce,
 S_0 [mm²] – počáteční plocha průřezu zkušebního tělesa.

Tažnost A

Tažnost se stanovuje jako prodloužení délky po přetržení v procentech původní délky. Charakterizuje plasticitu v tahu. Hodnota tažnosti je dána vztahem (2.10) [36, 38, 39].

$$A = 100 \cdot \left(\frac{L_u - L_0}{L_0} \right) \quad [\%] \quad (2.10)$$

kde: A [%] – tažnost materiálu,
 L_u [mm] – délka po přetržení,
 L_0 [mm] – počáteční délka.

Kontrakce Z

Kontrakce neboli zúžení vyjadřuje, podobně jako tažnost, plastické vlastnosti. Kontrakce je největší změna příčného průřezu po přetržení vyjádřená v procentech počátečního průřezu. Stanovuje se dle vztahu (2.11) [36, 38, 39].

$$Z = 100 \cdot \left(\frac{S_0 - S_u}{S_0} \right) \quad [\%] \quad (2.11)$$

kde: Z [%] – kontrakce materiálu,
 S_u [mm²] – plocha průřezu po přetržení,
 S_0 [mm²] – počáteční plocha průřezu zkušební tělesa.

2.2 Zkoušky tvrdosti

Tvrdost materiálu je definována jako odpor materiálu proti deformaci povrchu materiálu vyvolané působením cizího tělesa. Kvůli své jednoduchosti, bývají zkoušky tvrdosti používány pro odhad mechanických vlastností materiálu. Těmito zkouškami lze testovat malé vzorky i rozměrné součásti. Zkoušky tvrdosti lze dělit podle principu zkoušky, podle rychlosti zatěžující síly a dle účelu měření. Rozdělení zkoušek tvrdosti uvádí tab. 2.1. K nejpoužívanějším zkouškám tvrdosti patří zkoušky vnikací, jejichž principem je vyhodnocení vtisku, který na povrchu zanechá indenter [36, 37, 38, 39].

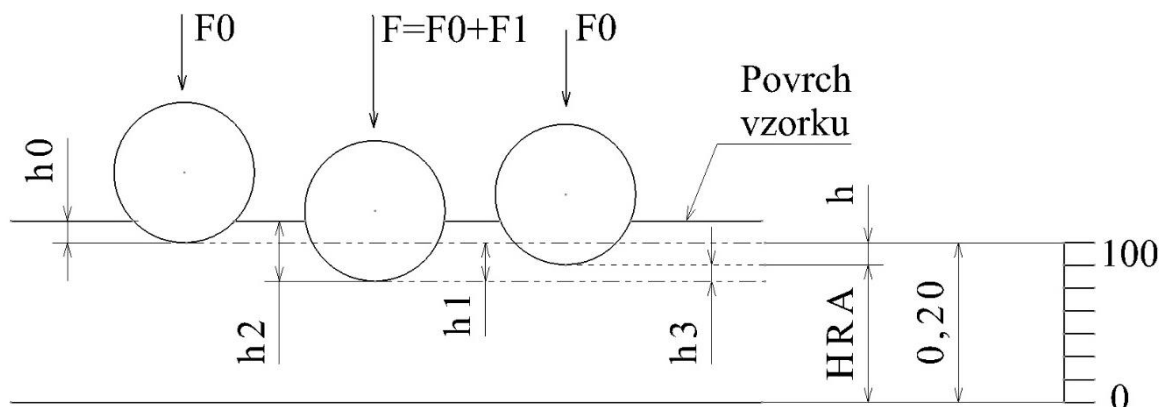
Tab. 2.1 Přehled zkoušek tvrdosti [37, 38]:

Zkoušky tvrdosti			
Zkoušky makrotvrdosti	Statické	Vrypové	Metoda Martens
		Vnikací	Metoda Brinell
			Metoda Vickers
			Metoda Rockwell
	Dynamické	Plastické nárazové	Metoda volným pádem (metoda dle Leeba)
			Metoda stlačenou pružinou (Baumann kladívko)
			Porovnávací metoda (Poldi kladívko)
		Elastické odrazové	Metoda volným pádem (Shoreho skleroskop)
			Metoda kyvadlová (duroskop)
Zkoušky mikrotvrdosti	Statické	Vnikací	Metoda Vickers při zatížení do 1 kg

2.2.1 Zkouška tvrdosti dle Rockwella

Zkouška tvrdosti dle Rockwella spočívá ve vtláčení diamantového kuželu s vrcholovým úhlem 120°, nebo kuličky ze slinutého karbidu (případně ocelové kuličky) do povrchu zkušební tělesa. Vtlačování probíhá ve dvou krocích. Tvrdost se stanovuje měřením trvalé hloubky vtisku při působení předběžného zatížení po odlehčení přídavného zatížení. Zkouška probíhá za podmínek daných normou ČSN EN ISO 6508-1. Stupnice tvrdosti dle Rockwella jsou specifikovány dle typu vnikacího tělesa, velikosti předběžného zkušební zatížení a celkového zkušební zatížení. Označení tvrdosti pak odpovídá použité stupnici, příklady označení obsahuje tab. 2.2 [39, 41].

Princip zkoušky zobrazuje obr. 2.5. Prvním krokem je přisuv indentoru ke zkušebnímu tělesu, po doteku hrotu se indentor zatíží předběžným zkušebním zatížením a vnikne do hloubky h_0 . Tím se odstraní vliv povrchové vrstvy. Poté dojde k navýšení zatížení o hodnotu přídavného zkušebního zatížení a hrot vnikne do hloubky h_2 . Po ustálení se odlehčí zpět na předběžné zatížení, čímž se hloubka sníží o pružnou deformaci a vtisk zůstane v plasticky deformovaném stavu. Tvrdost dle Rockwella je pak dána rozdílem základní hloubky (pro HRA 0,20 mm) a hloubky trvalého vtisku a určena dle stupnice [39, 41].



Obr. 2.5 Princip zkoušky tvrdosti dle Rockwella – dle [39].

Tab. 2.2 Příklady stupnic tvrdosti dle Rockwella [41]:

Stupnice tvrdosti dle Rockwella	Značka tvrdosti	Typ vnikacího tělesa	Předběžné zkušební zatížení F_0 [N]	Přídavné zkušební zatížení F_1 [N]	Celkové zkušební zatížení F [N]	Oblast použití
A	HRA	diamantový kužel	98,07	490,3	588,4	20-88 HRA
B	HRB	kulička 1,587 mm	98,07	882,6	980,7	20-100 HRB
C	HRC	diamantový kužel	98,07	1373	1471	20-70 HRC

2.2.2 Zkouška tvrdosti dle Vickerse

Při zkoušce tvrdosti dle Vickerse je do materiálu vtlačován diamantový pravidelný čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem 136° . Po odlehčení se měří délka úhlopříček vtisku. Princip zkoušky znázorňuje obr. 2.6. Tvrdost dle Vickerse se pak stanovuje vztahem (2.12) [39].

$$HV = 0,1891 \frac{F}{d^2} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (2.12)$$

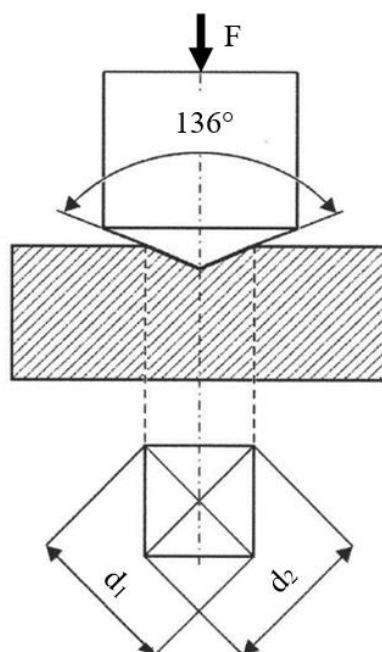
kde: $HV [N/mm^2]$ – tvrdost dle Vickerse,
 $F [N]$ – zatěžující síla,
 $d [mm]$ – aritmetický průměr délek úhlopříček vtisku.

Tvrdość podle Vickerse se označuje číselnou hodnotou tvrdosti, kterou následuje označení HV a číslice charakterizující velikost zkušebního zatížení v kilopondech. V případě, že zatížení trvalo jinou dobu než 10 až 15 s, zapisuje se za lomítkem použitá doba zátěže v sekundách. Podmínky zkoušky se řídí normou ČSN EN ISO 6507-1 [39, 41].

Příklady označení tvrdosti [39]:

185 HV 30 – tvrdost dle Vickerse 185 při zatížení 30 kp při době zatížení 10 až 15 s.

640 HV 30/20 – tvrdost dle Vickerse 640 při zatížení 30 kp při době zatížení 20 s.



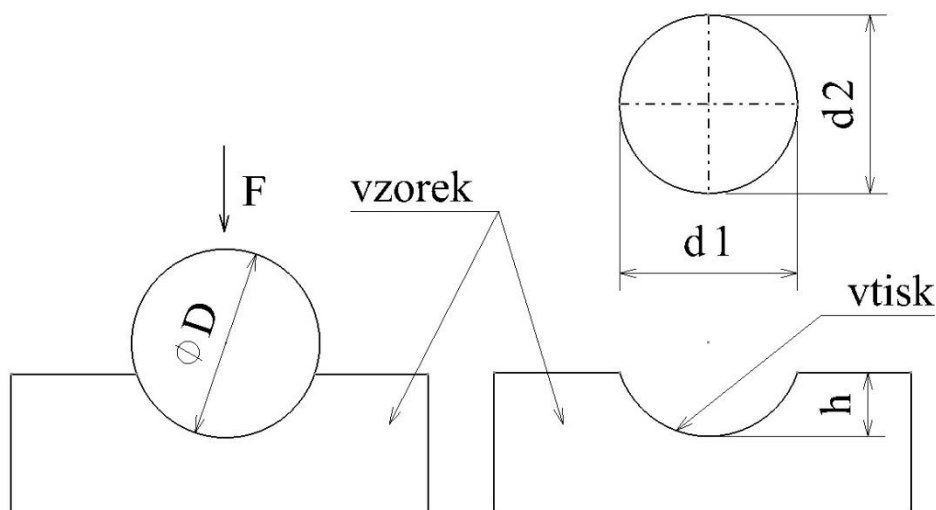
Obr. 2.6 Princip zkoušky tvrdosti dle Vickerse [39].

2.2.3 Zkouška tvrdosti dle Brinella

Zkouška tvrdosti dle Brinella spočívá ve vtlačování kuličky ze slinutého karbidu do povrchu zkoušeného materiálu. Po odlehčení zatížení se měří průměr vtisku ve dvou navzájem kolmých směrech. Princip zkoušky znázorňuje obr. 2.7. Průměr kuličky může být 10; 5; 2,5; nebo 1 mm. Pokud to velikost vzorku umožňuje, používá se kulička o průměru 10 mm, aby plocha vtisku byla co největší. Podmínky zkoušky stanovuje norma ČSN EN ISO 6506-1. Hodnota tvrdosti dle Brinella je vyjádřena jako poměr zatížení k velikosti plochy vtisku vztahem (2.13) [39, 41].

$$HBW = 0,102 \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (2.13)$$

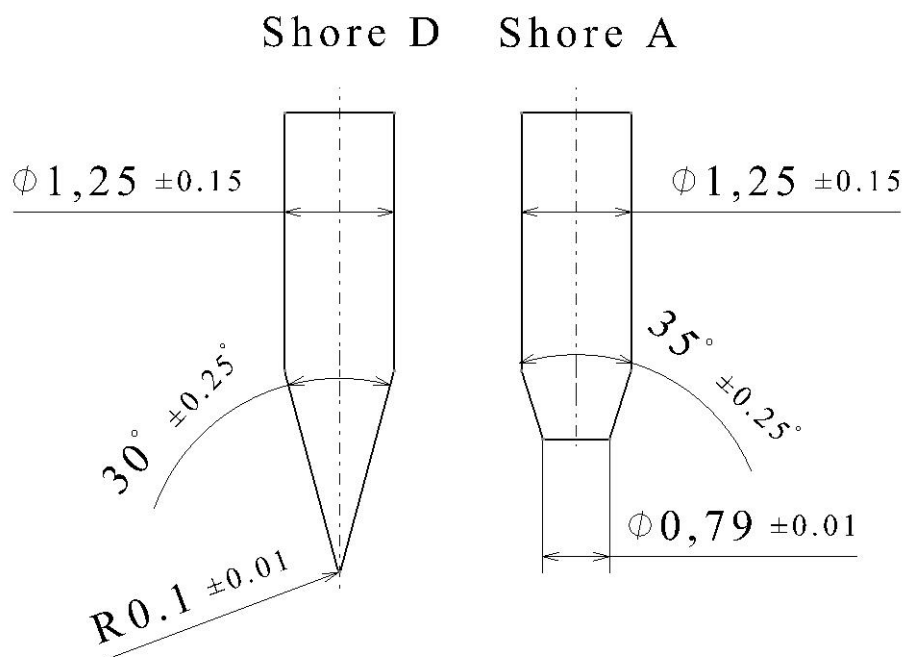
kde: HBW [N/mm²] – tvrdost dle Brinella,
 F [N] – zatěžující síla,
 d [mm] – aritmetický průměr dvou na sebe kolmých průměrů vtisku,
 D [mm] – průměr indentoru.



Obr. 2.7 Princip zkoušky tvrdosti dle Brinella – dle [39].

2.2.4 Zkouška tvrdosti metodou Shore

Metoda měření tvrdosti Shore je používána pro měření tvrdosti nekovových materiálů. Princip metody spočívá ve vtlačování zkušebního tělesa do zkušební vzorku daným zatížením, přičemž tvrdost materiálu určuje hloubka, do které je hrot vtlačen. K vyvození zatížení se využívá kalibrované pružiny. Měření tvrdosti Shore má několik různých stupnic, které jsou určeny pro danou tvrdost materiálů a liší se tvarem indentoru a velikostí zkušebního zatížení. Pro plasty používanými stupnicemi tvrdosti jsou A pro měkké plasty a pryže, D pro středně tvrdé plasty, AO pro pryže s nízkou tvrdostí a AM pro tenká tělesa z pryže. Tvar hrotu pro metody Shore A a Shore D zobrazuje obr. 2.8 [19, 42, 43].



Obr. 2.8 Schéma indentorů pro metodu měření tvrdosti Shore D, Shore A – dle [43].

3 CHARAKTERISTIKA TECHNOLOGIÍ 3D TISKU

Obsahem této kapitoly je popis principu vybraných technologií 3D tisku. Jedná se o aditivní technologie, které jsou založeny na postupném kladení materiálu ve vrstvách až do dosažení požadovaného tvaru součástí. Aditivní technologie lze dělit dle podoby vstupního materiálu na technologie na bázi fotopolymerů, práškových materiálů a pevných materiálů. Přehled vybraných aditivních technologií včetně podoby vstupního materiálu obsahuje tab. 3.1. Aditivní technologie jsou nedílnou součástí metody RP (Rapid Prototyping), která slouží k rychlé výrobě fyzických prototypů a v rámci vývojového procesu umožňuje výrobu prototypu bez nutnosti nákladné výroby forem. Prototyp pak lze využít pro ověření funkce součástí, designu i pro názornější komunikaci se zákazníkem [44, 45, 46, 47].

Tab. 3.1 Přehled aditivních technologií [47, 48]:

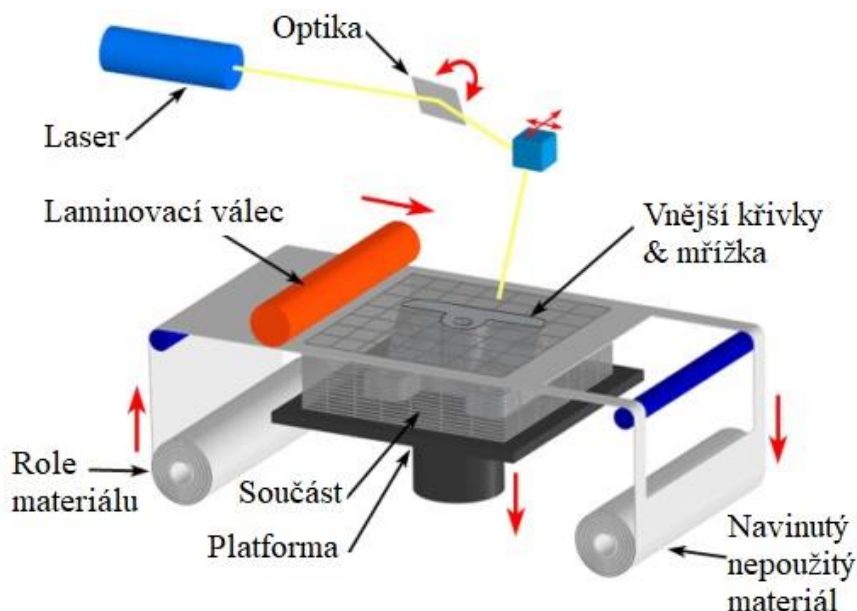
Aditivní technologie	Zkratka	Vstupní materiál
Fused Deposition Modeling	FDM	drát (ABS, PETG, PLA, ASA, PC, vosk)
Laminated Object Manufacturing	LOM	fólie (papír, nylon, polyester, keramika)
Stereolithography	SLA	fotopolymery
Digital Light Processing	DLP	
Solid Ground Cutting	SGC	
PolyJet	PJ	
Selective Laser Sintering	SLS	polyamid, nylon, kovové a keramické prášky
Direct Metal Laser Sintering	DMLS	kovové prášky
Three-Dimensional Printing	3DP	kovové a keramické prášky

3.1 Aditivní technologie na bázi pevných materiálů

Pro tuto skupinu technologií je vstupní materiál v pevné podobě. Jedná se např. o fólie či drát navinutý na cívku.

3.1.1 Laminated Object Manufacturing (LOM)

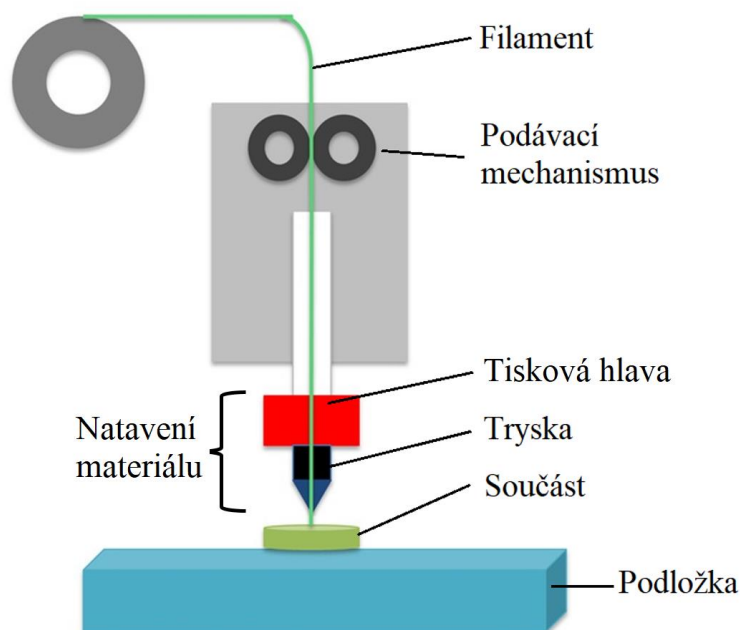
Aditivní technologie laminování LOM využívá jako vstupní polotovar fólie. Princip metody znázorňuje obr. 3.1. Na jedné straně fólie je nanesen příslušný nátěr, který ji přilepí k předchozí vrstvě, přičemž přilnutí fólie je zajištěno vyhřívaným válcem. Fólie je vyřezána do požadované kontury a postupně vrstvena do celkového objemu součástí. Nevýhodou této metody je omezená pevnost, kterou určuje pojivo jednotlivých vrstev. Výhodou metody je široké spektrum materiálu – využívají se např. papírové, nylonové či polyesterové fólie, metodu lze ale využít i pro keramiku a kompozitní materiály [44, 46, 48, 49].



Obr. 3.1 Princip technologie LOM [49].

3.1.2 Fused Deposition Modeling (FDM) / Fused Filament Fabrication (FFF)

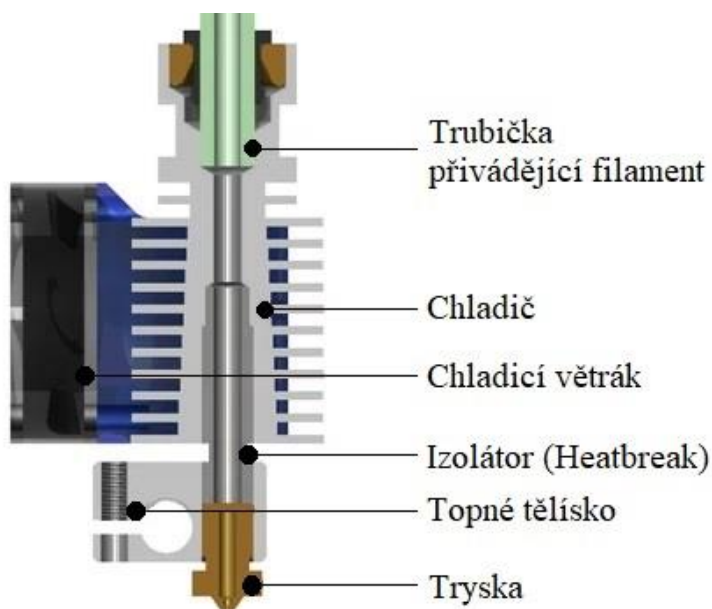
Technologie FDM a FFF vycházejí ze stejného principu, jejich odlišností je, že při metodě FDM se využívá vyhřívané komory, zatímco FFF využívá vyhřívané podložky. Technologie FFF je nejrozšířenější metodou 3D tisku, kvůli cenové dostupnosti zařízení i materiálů. Vstupní materiál je ve formě drátu ($\varnothing 1,75$ mm, potažmo $\varnothing 3$ mm) nejčastěji navinutého na cívce. Principem metody je natavování vstupního materiálu a jeho vrstvení v požadovaném tvaru. Po vystavění vrstvy se tisková hlava posouvá o výšku vrstvy. Tato metoda vyžaduje stavbu podpor. Princip metody FFF/FDM znázorňuje obr. 3.2 [44, 47, 48].



Obr. 3.2 Princip technologie FFF/FDM [50].

Drát neboli filament, je přiveden do tiskové hlavy – *extruderu*. Tisková hlava se skládá z podávacího mechanismu (krokový motor, podávací kolečka) a *hotendu*. *Hotend* je sestava dílů, která slouží k natavení materiálu. Tuto sestavu lze rozdělit na dvě části – chladnou (chladič, zásobník) a horkou (topné těleso, tryska), které jsou odděleny izolátorem (*heatbreak*). Jednotlivé díly sestavy zobrazuje schéma na obr. 3.3 [46, 47].

Podávací mechanismus vtlačuje materiál požadovanou rychlostí do chladiče. Materiál pokračuje do zásobníku a skrze izolátor vstupuje do topného tělesa. V něm je materiál nataven a následně je kladen tryskou v požadované geometrii po jednotlivých vrstvách. Kontura kladení materiálu se skládá z vnějších smyček (perimetrů) a vnitřní výplně, která může mít různý tvar a hustotu [46, 47].

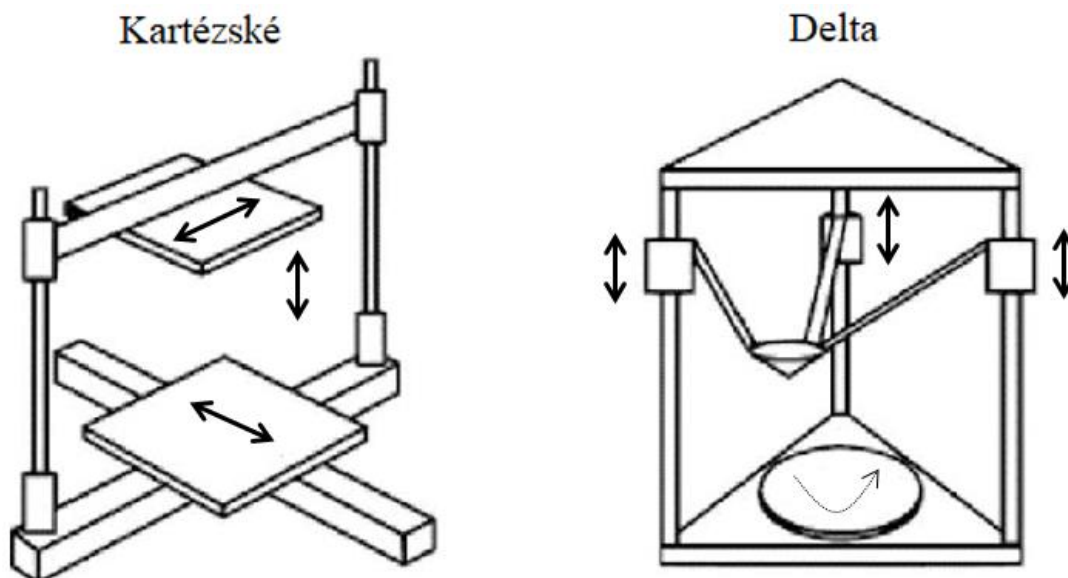


Obr. 3.3 Hotend E3D V6 – schéma [53].

Výhodou této metody je možnost výroby funkčních prototypů, které mají vlastnosti obdobné jako konečné produkty. Další výhodou je, že při metodě vzniká odpadní materiál pouze ve formě podpurného materiálu. Nevýhodou je omezená přesnost, která je daná průměrem trysky. Průměr trysky také významně ovlivňuje rychlost procesu výroby, proto je vhodné nalézt kompromis mezi požadovanou přesností a tiskovým časem [46, 47, 48].

Jelikož metoda vyžaduje stavbu podpor, je nutné je po tisku z výrobku odstranit. Pro snížení času post-processingu lze ke stavbě podpor využít jiný materiál, než ze kterého je tvořena samotná součást – podpurný materiál např. rozpustný v lázni (voda, aceton). Zároveň se tím zvýší kvalita povrchu součástí. Pro tisk z více materiálů lze použít zařízení se dvěma nezávislými tiskovými hlavami nebo využít multi-materiální jednotky, která mění materiál dle řídicího programu a lze ji využít i pro více barevný tisk. Její nevýhodou je vznik odpadu během výměny materiálů [51, 52].

FDM/FFF tiskárny mohou být různého uspořádání, nejčastěji používanou konstrukcí je kartézská (viz obr. 3.4) – pohyb v osách X, Y, Z vykonávaný podložkou nebo tiskovou hlavou (např. pohyb v ose Y vykonává podložka, pohyb v osách X a Z koná tisková hlava). Dalším často využívaným uspořádáním je konstrukce delta (obr. 3.4), která využívá k řízení pohybu tiskové hlavy tři ramena, která jsou uchycená na lineárních pojezdech. Poloha tiskové hlavy je řízena pozicí jednotlivých ramen [54].



Obr. 3.4 Konstrukce tiskáren – kartézské, delta [55].

3.2 Aditivní technologie na bázi fotopolymerů

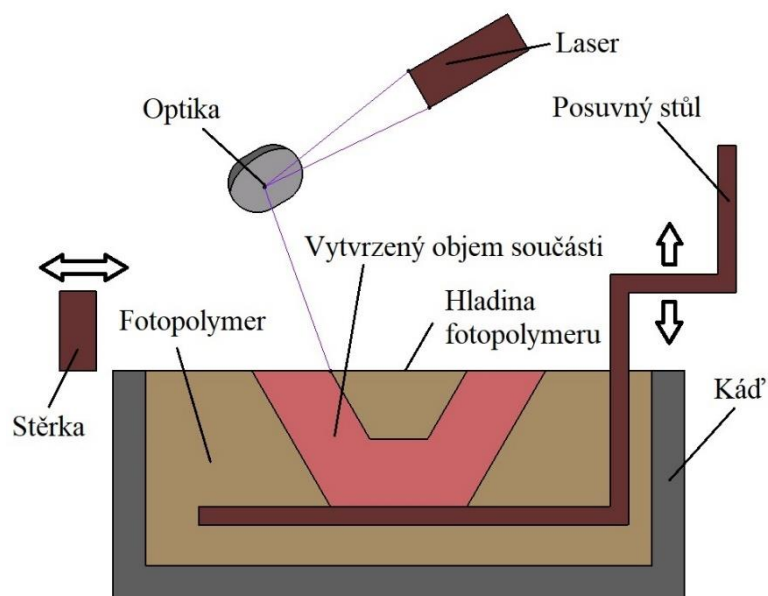
Aditivní technologie na bázi fotopolymerů spočívají ve vytvrzování kapaliny uvnitř nádoby. Vytvrzování polymeru probíhá po vrstvách, po vytvrzení vrstvy se stůl s nádobou posouvá o výšku následující vrstvy. Po vytvrzení celého objemu součásti se přebytečná kapalina odsaje, filtruje a může být použita pro další výrobu [46, 47].

3.2.1 Stereolithography (SLA)

SLA je nejstarší aditivní technologií. Vytvrzení vrstev materiálu probíhá pomocí UV záření z laseru. Princip metody znázorňuje obr. 3.5. Laserový paprsek vytvrdí vrstvu v požadované 2D kontuře, po vytvrzení vrstvy a posuvu stolu stírací lišta zarovná nanesenou pryskyřici na požadovanou tloušťku. Postup se následně opakuje až po vytvoření celé součásti. Po tisku se z výrobku vodou omyjí zbytky kapaliny, odstraní podpory a poté je výrobek vytvrzen v UV komoře, čímž se zvýší také integrita povrchu. Výhodou metody SLA je vysoká přesnost modelů a integrita povrchu. Nevýhodou je naopak potřeba stavby podpory a nutnost post-processingu v UV komoře [44, 46, 47].

3.2.2 Digital Light Processing (DLP)

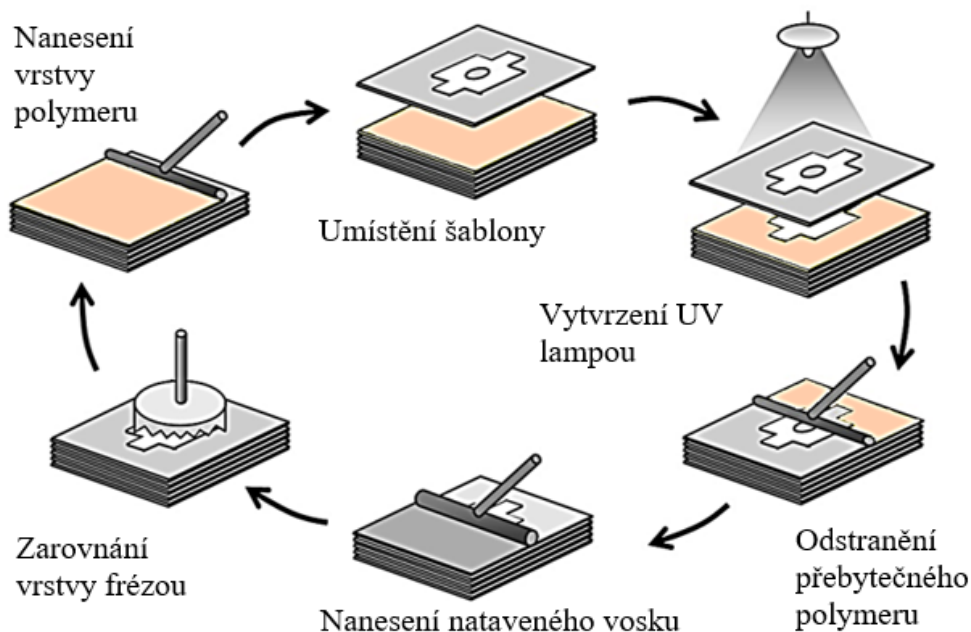
Tato technologie je obdobou SLA, hlavním rozdílem mezi nimi je použití projektoru jako zdroje UV záření. Odlišností této metody je také pohyb nosné desky po vytvrzení směrem nahoru, součást tedy vzniká vzhůru nohama. Výhodou oproti metodě SLA je vytvrzování celé vrstvy zároveň, nevýhodou naopak přesnost omezená rozlišením projektoru [47].



Obr. 3.5 Princip technologie SLA – dle [46].

3.2.3 Solid Ground Cutting (SGC)

Metoda spočívá ve vytvrzení vrstvy polymeru UV zářením dle negativní šablony. Šablonová deska je pokryta vrstvou toneru, který tvoří clonu proti UV záření, a vytvrzování tak probíhá pouze v dané kontuře. Po vytvrzení vrstvy polymeru na nosné desce se odstraní šablona a odsaje se přebytečný objem kapaliny. Poté se do nevyplněných otvorů nanese roztavený vosk, který slouží jako podpora pro následující vrstvu. Následuje zarovnání vrstvy frézou a nanesení další vrstvy polymeru. Po zhotovení součásti následuje dokončení ozařovací UV lampou. Princip metody je zobrazen na obr. 3.6. Za výhody této metody lze považovat vytvrzení celé vrstvy naráz, snadné odstranění podpor a dobrou strukturu modelu. Nevýhodami jsou vznik odpadního materiálu frézováním, velký rozměr a hlučnost zařízení [47, 48].



Obr. 3.6 Princip technologie SGC – dle [46].

3.3 Aditivní technologie na bázi práškových materiálů

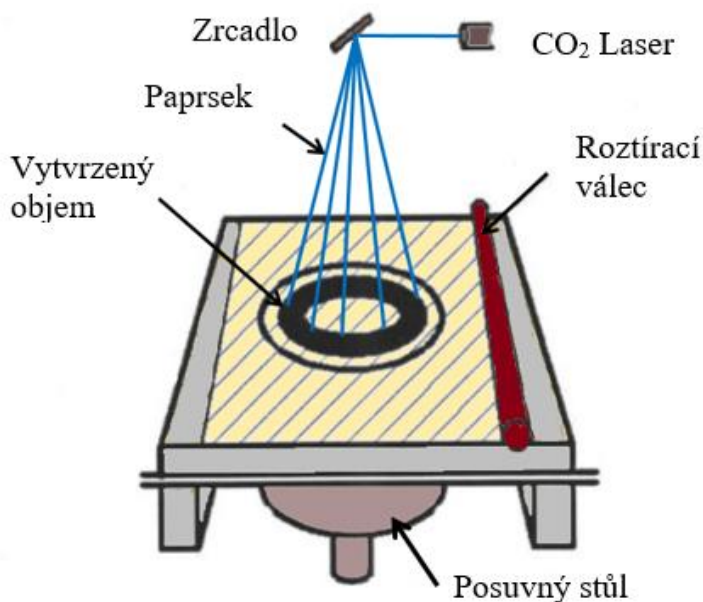
Vstupní materiál u těchto metod je ve formě prášku a jeho vytvrzení probíhá spékáním či natavením. Výhodou těchto metod je použití nespečeného prášku jako podpůrného materiálu, není tedy nutná stavba podpor, čímž se sníží výrobní čas i spotřeba materiálu. Nevytvrzený materiál se po ukončení procesu odsaje [44, 46, 47, 48].

3.3.1 Three-Dimensional Printing (3DP)

Materiál ve formě prášku nanesený na podložce je spojován pojivem, které nanáší tisková hlava. Po spojení vrstvy se posune nosná deska o výšku vrstvy a nanese se materiál pro následující vrstvu. Nespojený materiál tvoří podporu pro další vrstvy. Po vytvrzení celé součásti se přebytečný prášek odstraní odprašovacím a vibračním systémem. Výhodami této metody jsou pevnost součástí a přesná výroba konstrukčních detailů, modely lze použít pro výrobu forem [46, 47, 48].

3.3.2 Selective Laser Sintering (SLS)

Prášek je nanesen válečkovým mechanismem na desku v požadované výšce vrstvy a spékán působením CO₂ laseru, a to pouze v požadované ploše. Po vytvrzení vrstvy se stůl posune o výšku vrstvy níže a nanese se další vrstva materiálu. Laser ohřívá prášek na teplotu, při které nedochází k natavování materiálu, ale která je dostatečně vysoká pro vzájemné navázání částic. Nespečený prášek pak slouží jako podpora pro následující vrstvy. Princip metody znázorňuje obr. 3.7. Výhodou této metody je široké spektrum materiálů (kovy, plasty, keramika). Nevýhodami jsou velké rozměry zařízení, energetická náročnost a nižší kvalita povrchu součástí, která zapříčiňuje potřebu dokončovacích operací [44, 47, 48].



Obr. 3.7 Princip technologie SLS – dle [44].

3.3.3 Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

Tato metoda je obdobná jako SLS, ale dochází při ní k lokálnímu natavení materiálu laserem. Používanými materiály jsou kovy a jejich slitiny, proto je pracovní komora během tisku vyplněna dusíkem, aby byl díl chráněn před oxidací [47, 48].

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Tato část práce zahrnuje postup vykonání experimentální části, včetně vyhotovení vzorků, variant degradace a provedení mechanických zkoušek. Experimentální část vychází z poznatků zpracovaných v teoretické části.

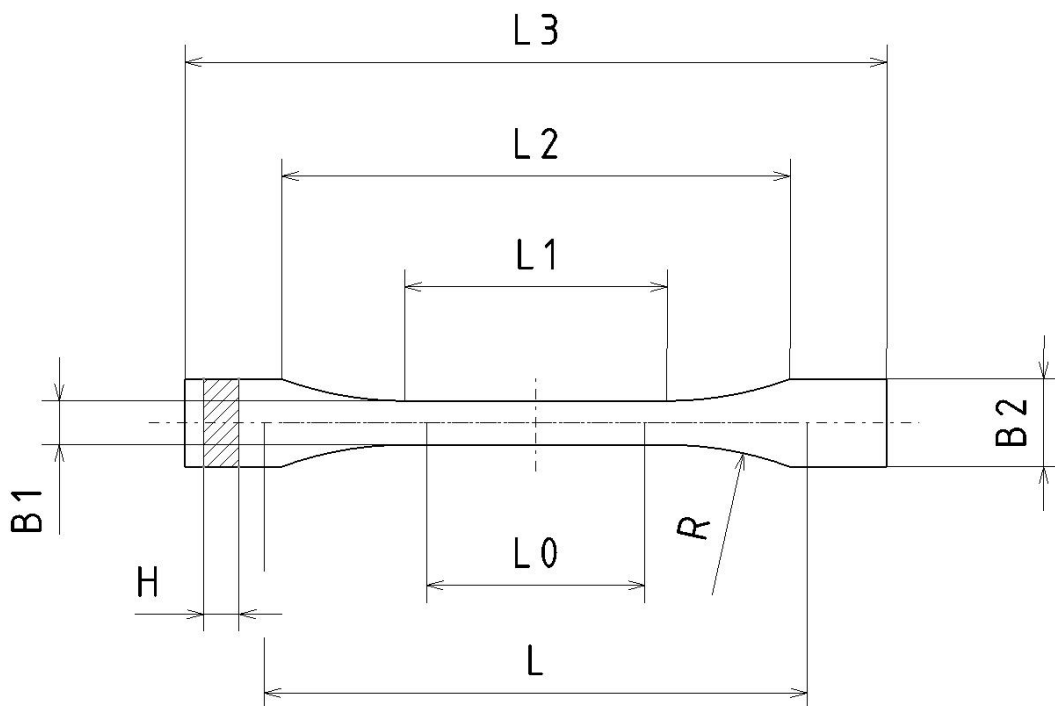
4.1 Postup zhotovení vzorků pro mechanické zkoušky

Tato kapitola popisuje postup přípravy zkušebních vzorků – volbu tvaru, materiálu a výrobu vzorků na 3D tiskárně.

4.1.1 Volba tvaru zkušebních vzorků

Tvar a rozměry vzorků pro tahovou zkoušku byly stanoveny na základě normy ČSN EN ISO 527-2:2012 Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty. Tato norma stanovuje podmínky pro stanovení tahových vlastností plastových materiálů. Ačkoliv se jedná se o normu týkající se vzorků vyrobených vstřikováním, lisováním, odléváním či vytlačováním, byla tato norma použita, protože podmínky pro vzorky vyráběné aditivními technologiemi nespécifikuje žádná norma [56].

Vzhledem k úspoře materiálu byl pro tahovou zkoušku zvolen tvar vzorků 1BA, který je zmenšený oproti standartním zkušebním tělesům typu 1A a 1B. Dalšími důvody k volbě tohoto tvaru bylo snížení nákladů a snížení času potřebného pro zhotovení vzorků. Tvar a rozměry vzorků stanovené normou popisuje obr. 4.1 respektive tab. 4.1 [56].

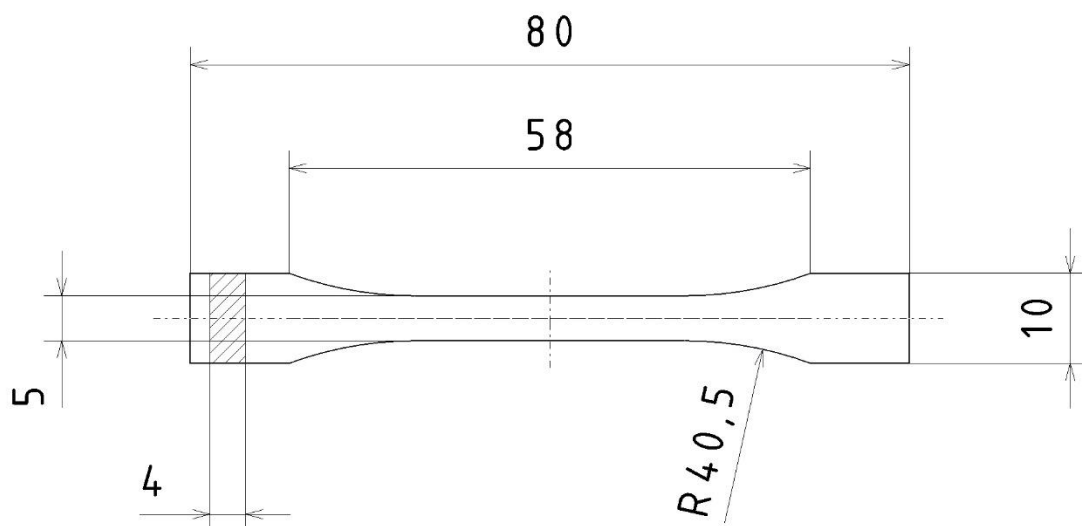


Obr. 4.1 Zkušební vzorek typu 1BA pro zkoušku tahem – dle [56].

Tab. 4.1 Rozměry zkušebního tělesa typu 1BA [56]:

Typ zkušebního tělesa: 1BA		[mm]
$L3$	Celková délka	≥ 75
$L1$	Délka zúžené části s rovnoběžnými hranami	$30,0 \pm 0,5$
R	Poloměr	≥ 30
$L2$	Vzdálenost mezi rozšířenými částmi s rovnoběžnými hranami	58 ± 2
$B2$	Šířka konců	$10,0 \pm 0,5$
$B1$	Šířka zúžené části	$5,0 \pm 0,5$
H	Tloušťka	≥ 2
$L0$	Počáteční měřená délka	$25,0 \pm 0,5$
L	Počáteční vzdálenost mezi čelistmi	$L2_0^{+2}$

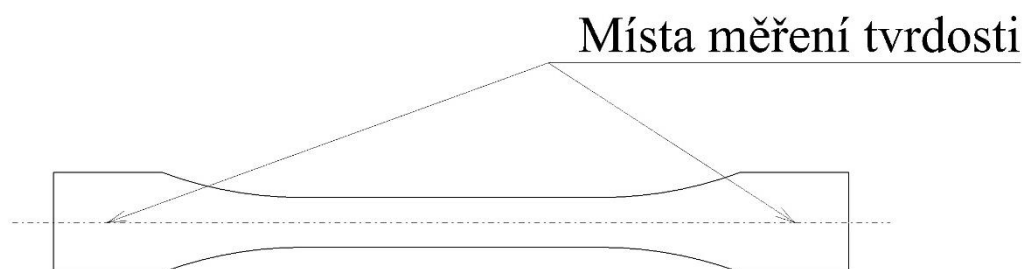
Model zkušební tyče pro tahovou zkoušku, který byl zvolen dle normy EN ISO 527-2:2012, byl vytvořen v CAD parametrickém softwaru Catia. Po vytvoření byl model exportován ve formátu .stl, který je nejpoužívanějším formátem pro export dat do sliceru. Zvolené rozměry zkušební tyče znázorňuje obr. 4.2.



Obr. 4.2 Schématické znázornění zvolené zkušební tyče.

Pro zkoušku tvrdosti metodou Shore D byly použity zkušební vzorky ze zkoušky tahem z důvodu úspory materiálu, nákladů i snížení výrobního času. Vzorky ze zkoušky tahem splňují požadavek minimální tloušťky zkušebního tělesa 4 mm dle normy ČSN EN ISO 868 Plasty a ebonit – Stanovení tvrdosti vtlačováním hrotu tvrdoměru (tvrdost Shore) [57].

Místa vniku indentoru do zkušebního tělesa zobrazuje obr. 4.3.



Obr. 4.3 Místa pro měření tvrdosti.

4.1.2 Volba materiálů pro zhotovení zkušebních vzorků

Pro výrobu zkušebních vzorků byly zvoleny často používané materiály pro FFF/FDM technologii. Jedná se o materiály PLA, PETG, ASA a ABS. Pro každý materiál byly zvoleny produkty od třech různých výrobců, které jsou běžně dostupné na českém trhu. Od každého typu materiálu a výrobce bylo vyrobeno 7 zkušebních vzorků pro každou sérii testování. Dohromady tedy jednu testovací sadu tvořilo 12 skupin o 84 vzorcích. Přehled použitých materiálů a konkrétních výrobců obsahuje tab. 4.2.

Tab. 4.2 Přehled použitých materiálů a jednotlivých výrobců.

Materiál	Výrobce	Barva	Materiál	Výrobce	Barva
PLA	Prusament	Galaxy Silver	ABS	Fillamentum	Natural
	Plasty Mladeč	Zelená		Gembird	Černá
	Spectrum	Bílá Polar		Plasty Mladeč	Modrá
PETG	Prusament	Orange	ASA	C-TECH	Černá
	Plasty Mladeč	Černá		Devil Design	Černá
	Spectrum	Bílá Arctic		Plasty Mladeč	Natur

4.1.3 Pre-processing, tiskové parametry

Model ve formátu .stl exportovaný ze softwaru Catia byl naimportován do programu PrusaSlicer, který slouží ke generování řídicího programu 3D tiskárny.

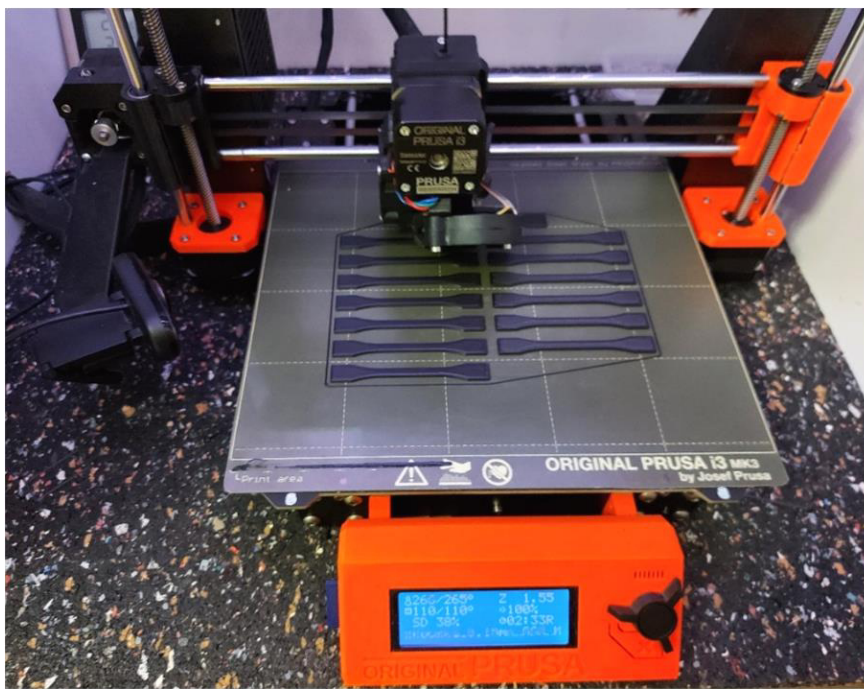
Byly zvoleny následující tiskové parametry:

- výška vrstvy 0,15 mm (první vrstva 0,2 mm),
- tři perimetry,
- přímočará 100% výplň, orientovaná střídavě 45° a -45°,
- orientace vzorků na podložce na plocho a v horizontální poloze,
- teploty trysky a vyhřívané podložky pro jednotlivé materiály dle doporučení výrobce.

Ze softwaru PrusaSlicer byl následně vyexportován řídicí program tiskárny ve formátu .gcode.

4.1.4 Použité 3D tiskárny a zhotovení vzorků

Pro výrobu vzorků byly použity FFF tiskárny Original Prusa i3 MK2S a Original Prusa i3 MK3S od výrobce Prusa Research. Jedná se o zařízení spadající do kategorie hobby, která dosahují nižší přesnosti v porovnání s profesionálními tiskárnami, ale jejich hlavní výhodou je cenová dostupnost. Výrobu vzorků zachycuje obr. 4.4. Celkem bylo zhotoveno 588 vzorků.



Obr. 4.4 Příprava vzorků na 3D tiskárně.

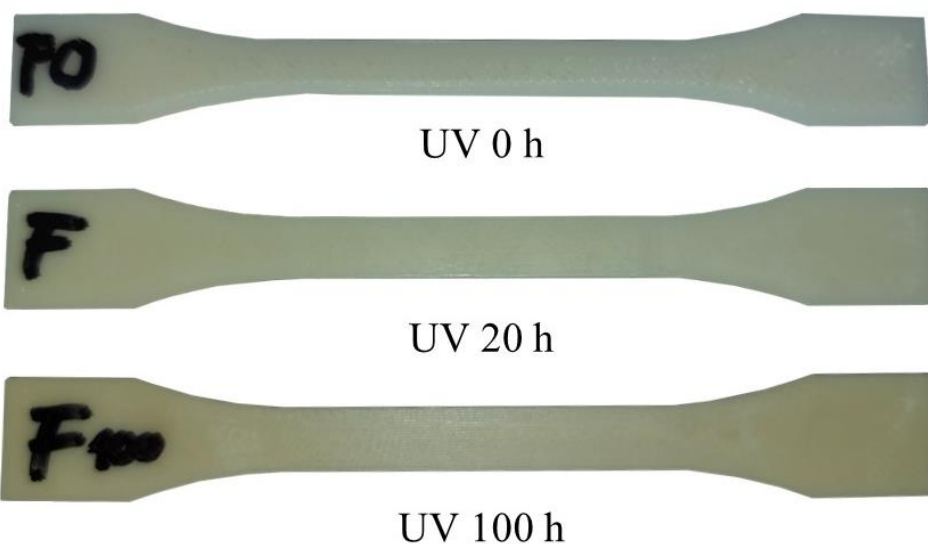
4.2 Vystavení vzorků degradačním vlivům

Vedle referenční sady byly jednotlivé sady vzorků vystaveny vybraným degradačním vlivům. Způsoby degradace byly voleny dle vypracované teoretické části a dle dostupných možností v laboratorních respektive domácích podmínkách.

4.2.1 UV záření

Vzorky byly vystaveny UV záření. Ozařování probíhalo v domácích podmínkách zařízením Mikrolux Chirana se rtuťovou výbojkou o výkonu 125 W. Osvětlení vzorků probíhalo ze vzdálenosti 40 cm a jeho doba činila 20 respektive 100 hodin, přičemž vzorky byly v pravidelných intervalech otáčeny tak, aby byl osvit z obou stran rovnoměrný. Po 20 hodinách bylo možné na vzorcích ABS (u světlejších odstínů) pozorovat barevné změny, projevující se mírným žloutnutím, a povrch vzorků PLA se stal lepkavým. U vzorků z materiálů PETG a ASA nebyly patrné žádné vizuální změny. Druhá sada byla osvětlována po dobu 100 h, po této době byly barevné změny u vzorků materiálu ABS patrnější (pro příklad Fillamentum ABS, viz obr. 4.5) a projevíly se mírně také u vzorků materiálu ASA.

ABS FILLAMENTUM



Obr. 4.5 Změna barevného odstínu vlivem působení UV záření – Fillamentum ABS.

4.2.2 Kondenzační komora

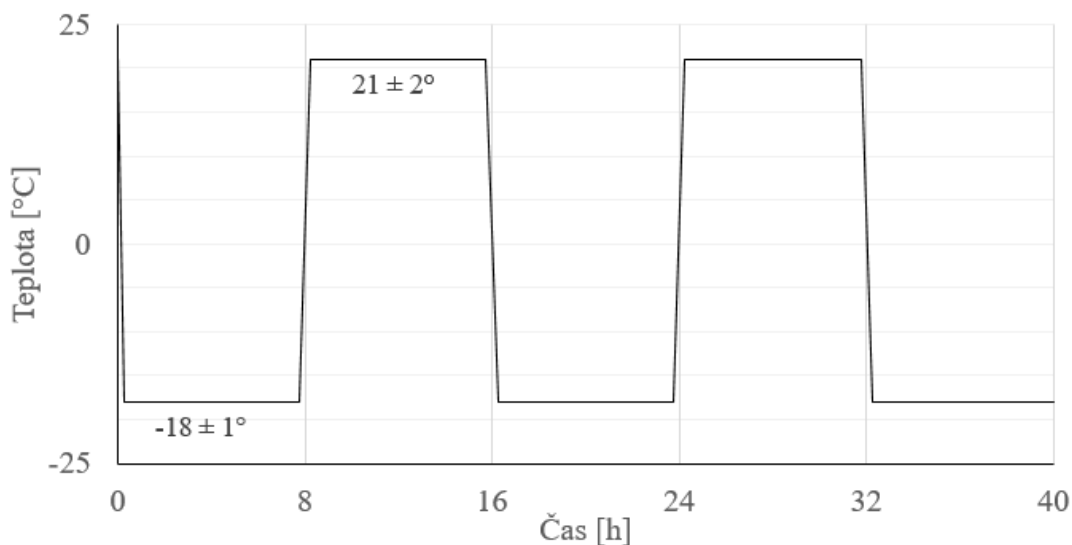
Sada vzorků pro umístění do kondenzační komory byla v prvním kroku zvážena, aby bylo možné na základě změny hmotnosti vzorků před a po umístění do komory odhadnout množství absorbované vlhkosti. Pro testování vzorků byla použita kondenzační komora KB300 CONSTANZO. Vzorky byly v kondenzační komoře vystaveny prostředí o 100% vlhkosti a teplotě 55 °C po dobu 100 hodin. Kondenzační komoru a do ní umístěné vzorky zachycuje obr. 4.6.



Obr. 4.6 Umístění vzorků do kondenzační komory KB300 CONSTANZO.

4.2.3 Teplotní cykly

Jedním ze zvolených způsobů degradace byly FT cykly – teplotní cyklování probíhalo střídáním působení mrazu -18 °C ($\pm 1\text{ °C}$) a pokojové teploty 21 °C ($\pm 2\text{ °C}$). Vzorky byly vystaveny celkově 130 takovýmto cyklům, přičemž doba jednoho cyklu činila 16 hodin. Průběh teplotního cyklu znázorňuje obr. 4.7.



Obr. 4.7 Schéma průběhu teplotního cyklování.

4.2.4 Výdrž na teplotě 60 °C

Další sada vzorků byla umístěna do pece po dobu 100 hodin při teplotě 60 °C (obr. 4.8). Tato teplota byla zvolena z toho důvodu, aby nedošlo k výrazné tvarové deformaci vzorků a bylo je tak možné otestovat. Zároveň se jedná o oblast teploty skelného přechodu pro materiál PLA. Pro zbylé materiály se jedná o teplotu pod teplotou skelného přechodu.

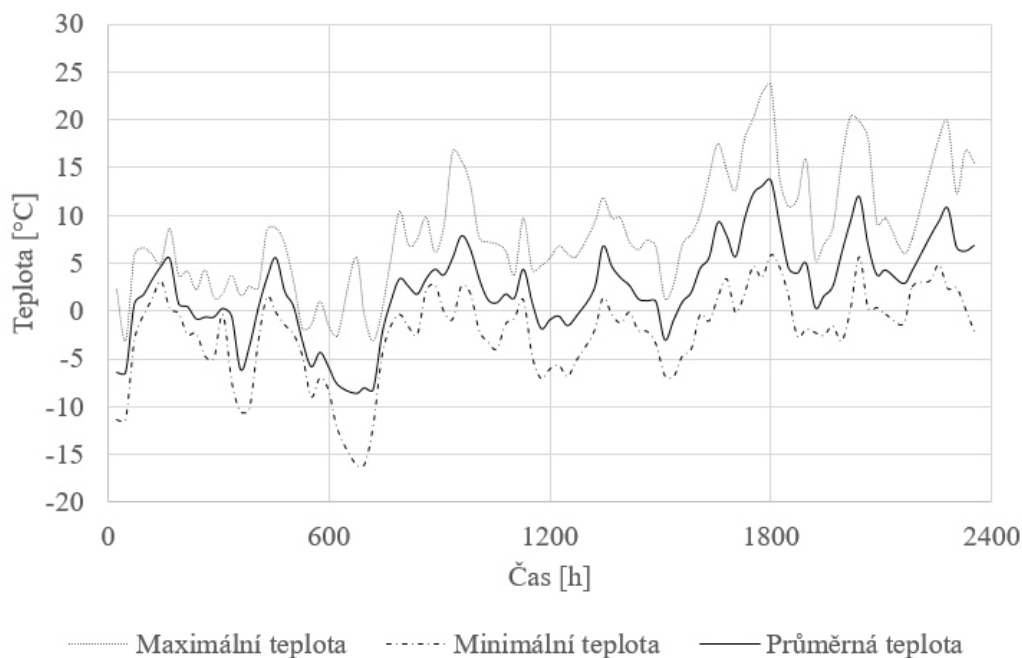


Obr. 4.8 Umístění vzorků do pece.

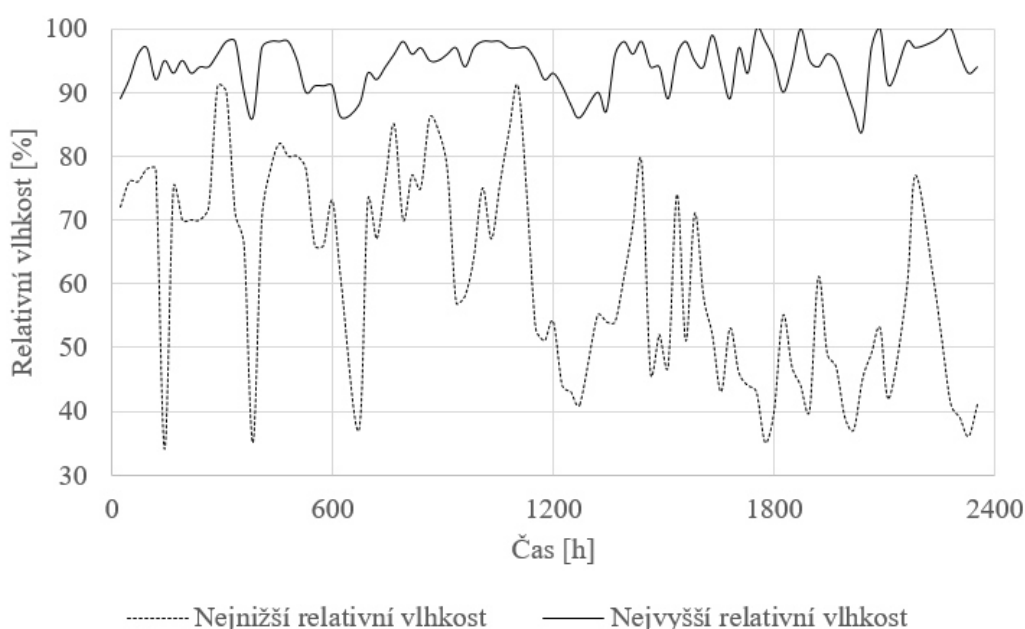
4.2.5 Povětrnostní vlivy

Posledním způsobem stárnutí vzorků bylo jejich umístění do venkovního prostředí po dobu 98 dní. Vzorky byly umístěny v zastřešeném prostoru, současně tak na ně působily změny teploty, sluneční svit a vlhkost vzduchu. Pro dokumentaci vývoje počasí byla využita data z amatérské meteorologické stanice vzdálené vzdušnou čarou necelých 7 km od místa testování. Průběhy teploty a vlhkosti během jednotlivých dní popisují obr. 4.9 respektive 4.10.

Dle údajů z jiné nedaleké meteorologické stanice, lze odhadovat celkovou délku slunečního svitu za celou dobu testování na 294 hodin, což činí v průměru 3 hodiny denně. Do délky slunečního svitu se započítává pouze sluneční záření o minimální intenzitě 120 W/m^2 [59].



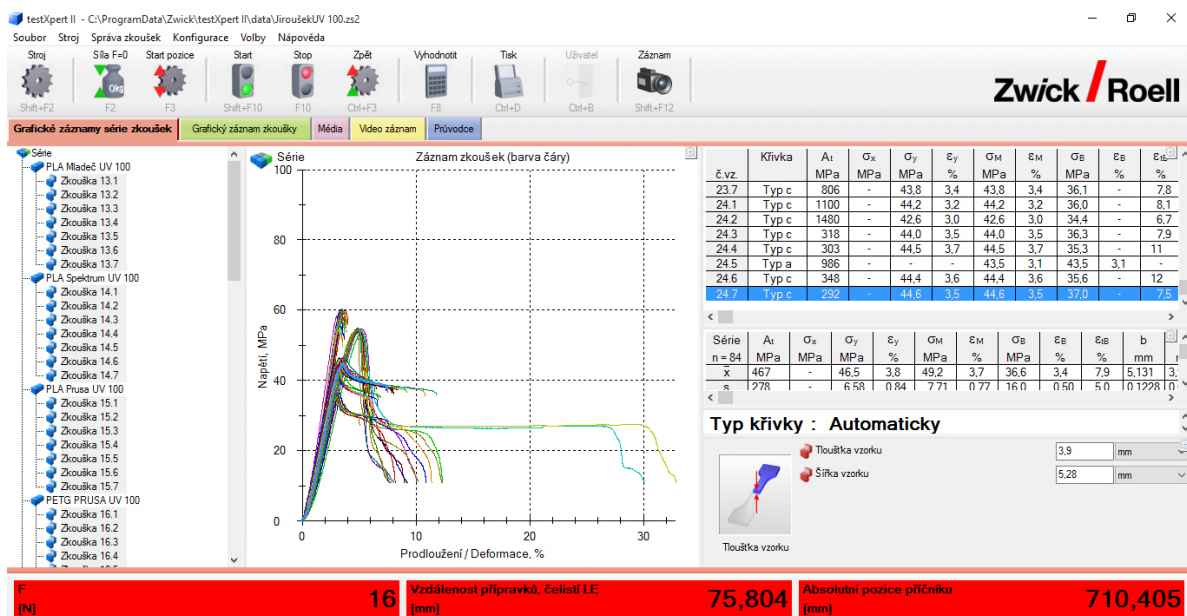
Obr. 4.9 Průběh teplot během venkovního testování – dle [58].



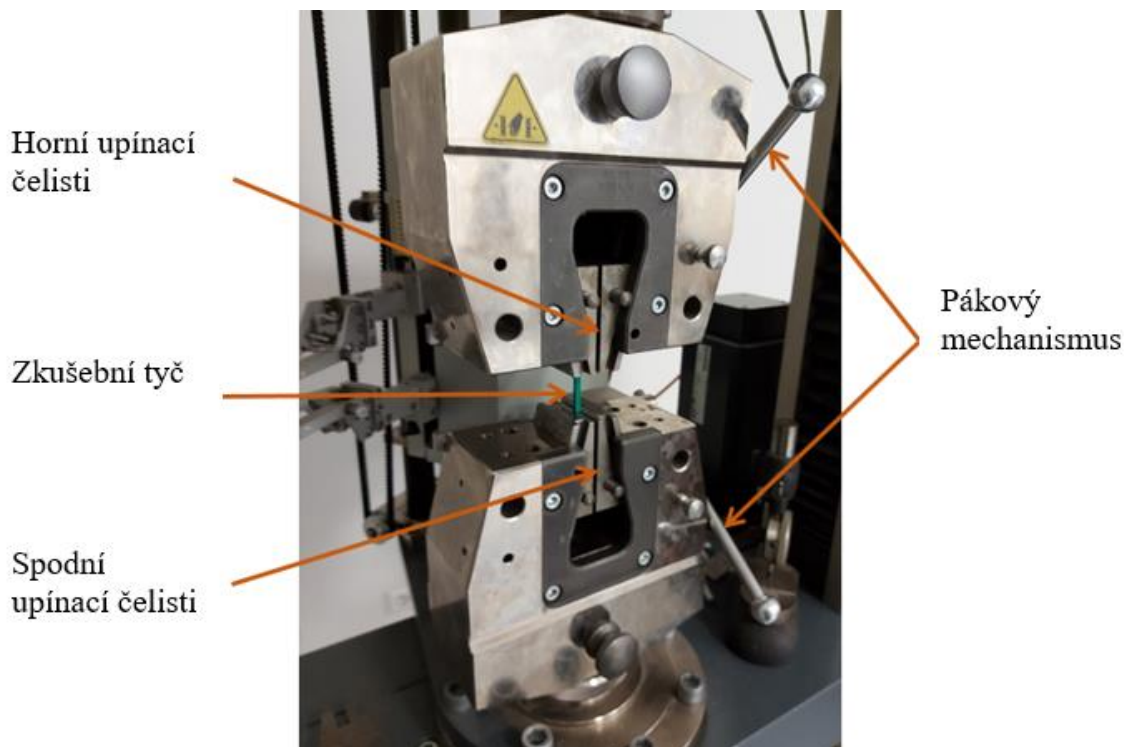
Obr. 4.10 Relativní vlhkost během venkovního testování – dle [58].

4.3 Provedení tahové zkoušky

K provedení tahové zkoušky bylo použito zkušební zařízení Zwick Z100 (obr. 4.13). Součástí zkušebního zařízení je také připojený notebook se softwarem testXpert, který slouží k vyhodnocování zkoušky (viz obr. 4.11). Do programu se vkládají vstupní parametry zkoušky – odpovídající norma (ČSN EN ISO 527), rozměry vzorků, počáteční vzdálenost upínacích čelistí a rychlost deformace. Při zkoušce se přímo vykresluje průběh tahové zkoušky a následně dochází k vyhodnocení vybraných parametrů (mez pevnosti, modul pružnosti či tažnost).



Obr. 4.11 Prostředí softwaru testXpert.



Obr. 4.12 Upínací mechanismus zařízení pro tahové zkoušky Zwick/Roell Z 100.

Prvním krokem provedení tahové zkoušky bylo přeměření rozměrů vzorků. Vlivem omezené přesnosti technologie FFF se rozměry vzorků mírně lišily, proto byla přeměřena tloušťka a výška vzorků každé testované sady, hodnoty byly zprůměrovány a vloženy do softwaru.

Po přeměření byl vzorek vložen do upínacích čelistí (obr. 4.12), které se sevřely pomocí pákového mechanismu. Následně bylo vizuálně zkontrolováno, zda se osa vzorku shoduje s osou zatěžování, a v případě potřeby byla pozice vzorku upravena.

Spuštění zkoušky se provádí v softwaru testXpert. V průběhu zkoušky je v něm zobrazována závislost zatěžující síly na prodloužení. Zkouška je automaticky ukončena přetržením vzorku. Výstupem zkoušky je průběh závislosti maximální síly na prodloužení, software následně vyhodnotí vybrané parametry. Tyto parametry a průběh zkoušky pak lze vyexportovat ve formátu .xls pro další zpracování.



Obr. 4.13 Zařízení pro tahové zkoušky
Zwick/Roell Z 100.



Obr. 4.14 Zařízení pro měření tvrdosti
Shore D a měření tvrdosti vzorku.

4.4 Provedení zkoušky tvrdosti

Tvrdost byla měřena metodou Shore D. Pro měření byl použit tvrdoměr Bareiss Digi-Test (viz obr. 4.14). Zkušební vzorek se umístí na podložku a zahájí se zkouška. Indentor je do materiálu vtláčován po dobu 15 sekund, poté je zkouška vyhodnocena a výsledná tvrdost se zobrazí na displeji. Pro další vyhodnocení byly naměřené hodnoty ručně zapisovány do softwaru Excel.

5 VYHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

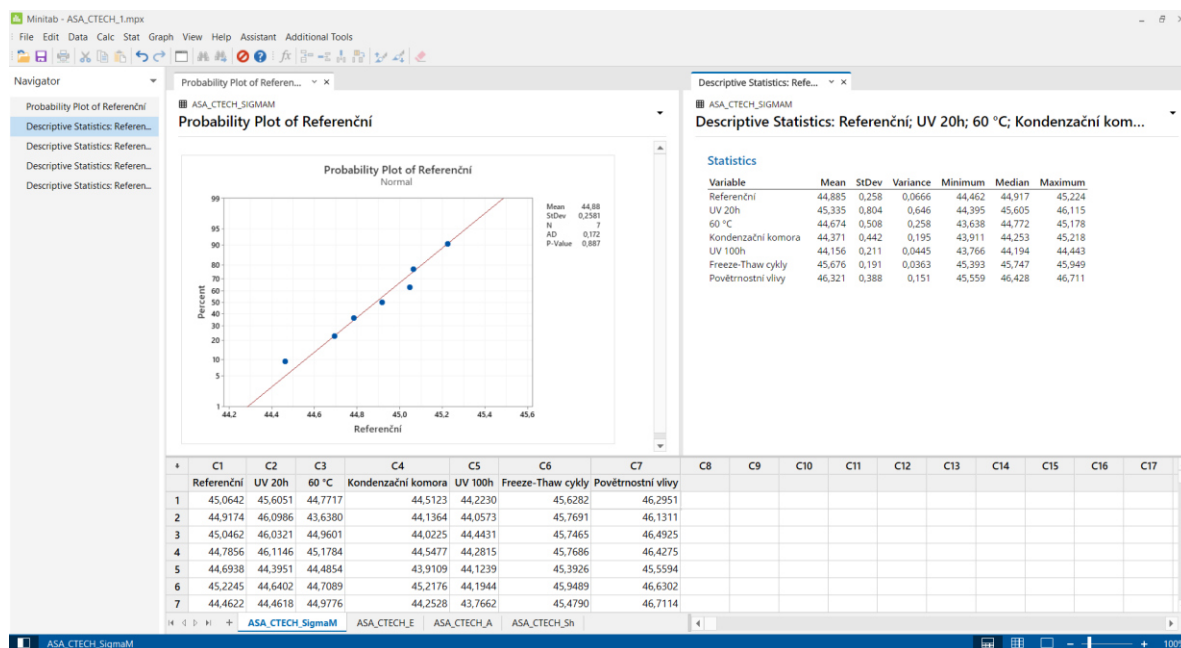
Tato kapitola se zabývá vyhodnocením dat získaných provedenými zkouškami. Data z experimentů byla zpracována pro každou skupinu vzorků dle materiálu a způsobu degradace. Vyhodnocovanými parametry jsou pevnost v tahu, modul pružnosti v tahu a tažnost, dále tvrdost měřená metodou Shore D.

5.1 Statistické vyhodnocení výsledků

Pro zpracování dat byl využit software Excel a statistický software Minitab, jehož prostředí zachycuje obr. 5.1. Prvním krokem statistického zpracování bylo provedení testu normality. Normalita je předpokladem pro výpočet statistických parametrů. Po konzultaci s panem Ing. Josefem Bednářem, Ph.D., který se zabývá statistikou, byl vzhledem k počtu vzorků využit Anderson–Darlingův test normality. Při tomto vyhodnocení normality platí, že pokud je P-hodnota větší než 5 %, mají data se spolehlivostí větší než 95 % normální rozdělení. Pokud je P-hodnota nižší než 5 %, je nutné některá data upravit. Po provedení testu normality byly určeny základní statistické parametry pro jednotlivá měření.

Vzhledem k počtu materiálů je dále uveden pouze příklad statistického vyhodnocení pro materiál PLA od firmy Plasty Mladeč. Statistické parametry pro ostatní materiály jsou obsaženy v příloze 1. Vyhodnocení parametrů meze pevnosti v tahu tohoto materiálu obsahuje tab. 5.1. Statistické parametry modulu pružnosti v tahu obsahuje tab. 5.2, parametry tažnosti pak tab. 5.3. Vyhodnocení statistických parametrů tvrdosti Shore D uvádí tab. 5.4.

Vyhodnocené parametry byly dále porovnány vždy s hodnotami referenčními, z důvodu zhodnocení vlivu jednotlivých degradačních faktorů. Pro porovnání hodnot byl využit také test Anova, na jehož základě lze na hladině spolehlivosti 95 % prohlásit, zda jsou hodnoty totožné, či nikoliv.



Obr. 5.1 Prostředí softwaru Minitab pro statistické zpracování dat.

Tab. 5.1 Základní statické parametry meze pevnosti v tahu – Plasty Mladeč PLA.

Plasty Mladeč PLA – Mez pevnosti v tahu [MPa]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	59,06	2,80	7,84	59,38	56,14	62,73
UV 20 h	54,87	0,93	0,86	54,97	53,24	55,92
Výdrž na teplotě 60 °C	54,23	2,00	3,99	54,33	50,56	56,38
Kondenzační komora	42,60	1,47	2,17	42,12	41,35	45,42
UV 100 h	58,81	1,25	1,57	59,32	56,79	60,29
Teplotní cykly	56,73	0,92	0,84	56,41	55,37	58,21
Povětrnostní vlivy	55,77	0,77	0,59	55,66	54,85	57,23

Tab. 5.2 Základní statické parametry modul pružnosti v tahu – Plasty Mladeč PLA.

Plasty Mladeč PLA – Modul pružnosti v tahu [MPa]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	742,7	46,9	2198,9	756,1	660,6	801,5
UV 20 h	701,9	24,1	581,4	703,5	657,6	733,5
Výdrž na teplotě 60 °C	677,1	54,7	2991,7	682,6	594,8	772,4
Kondenzační komora	611,8	96,7	9348,1	603,7	481,8	775,6
UV 100 h	759,1	50,5	2551,9	762,7	690,8	836,3
Teplotní cykly	657,5	32,9	1085,0	647,6	614,1	717,9
Povětrnostní vlivy	711,3	42,9	1836,9	724,4	659,2	780,8

Tab. 5.3 Základní statické parametry tažnosti – Plasty Mladeč PLA.

Plasty Mladeč PLA – Tažnost [%]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	9,75	0,72	0,52	9,82	8,80	10,99
UV 20 h	8,59	0,18	0,03	8,60	8,40	8,82
Výdrž na teplotě 60 °C	9,66	0,84	0,71	9,54	8,50	10,82
Kondenzační komora	12,08	2,09	4,35	12,19	9,63	15,85
UV 100 h	8,56	0,74	0,55	8,41	7,59	9,52
Teplotní cykly	11,17	1,08	1,16	11,41	9,69	12,93
Povětrnostní vlivy	8,92	0,48	0,23	8,78	8,31	9,73

Tab. 5.3 Základní statické parametry tvrdosti – Plasty Mladeč PLA.

Plasty Mladeč PLA – Tvrdost [HShD]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	80,61	0,82	0,67	80,70	78,80	81,80
UV 20 h	79,29	1,49	2,23	79,95	76,50	80,80
Výdrž na teplotě 60 °C	76,50	2,80	7,85	76,15	73,50	80,20
Kondenzační komora	78,20	2,63	6,91	78,20	75,60	80,80
UV 100 h	80,65	1,26	1,59	80,70	78,30	82,00
Teplotní cykly	80,58	0,88	0,78	80,35	79,40	81,70
Povětrnostní vlivy	81,17	1,18	1,38	81,10	79,40	83,00

5.2 Vliv UV záření

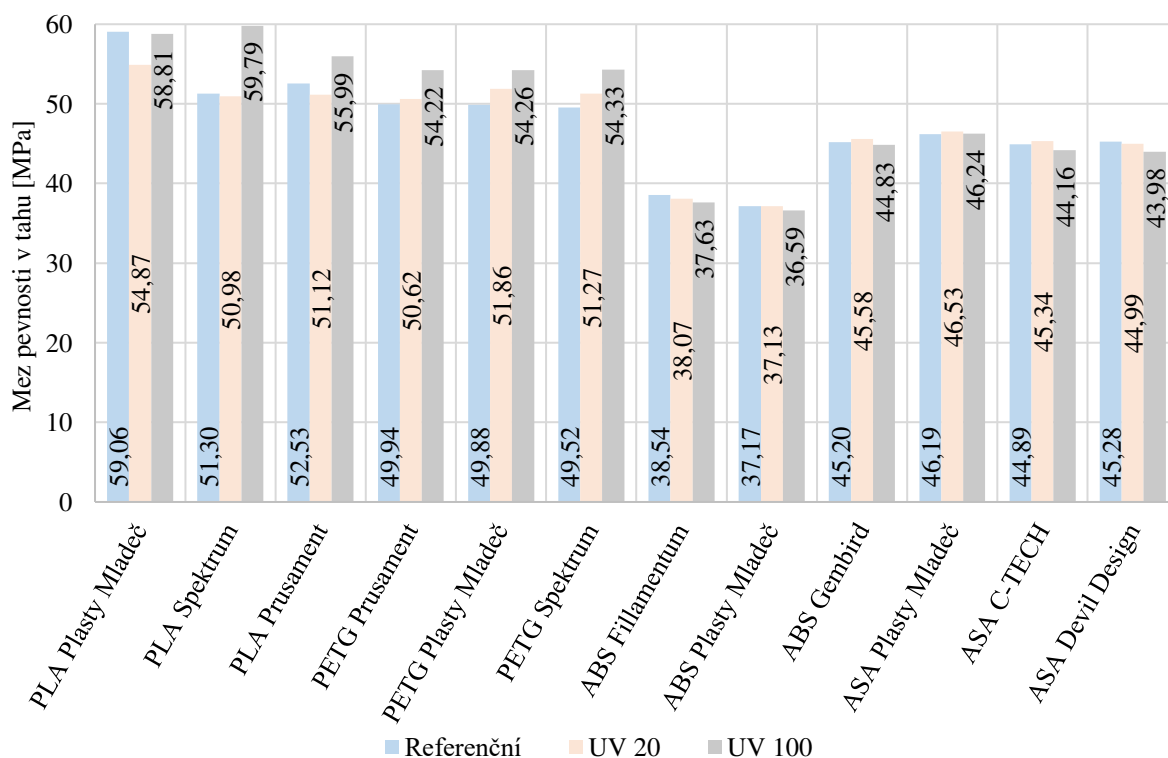
Pro posouzení vlivu UV záření na jednotlivé sledované parametry bylo využito grafické porovnání středních hodnot získaných statistickým zpracováním. Grafy porovnávají hodnoty referenční sady (*Referenční*), po 20 a po 100 hodinách UV záření (*UV 20* respektive *UV 100*).

Vliv UV záření na mez pevnosti v tahu materiálů zobrazuje graf na obr. 5.2. Z grafu je patrné, že hodnoty meze pevnosti nebyly UV zářením výrazně negativně ovlivněny. Mírný pokles je patrný u PLA Plasty Mladeč po 20 h expozice, klesající trend ale vyvrací hodnota po 100 h, kterou lze dle testu Anova považovat za totožnou s hodnotou referenční. Naopak nárůst meze pevnosti byl zaznamenán u materiálu PLA Spektrum a Prusament po 100 h ozáření, přičemž hodnoty po 20 h ozáření ovlivněny nebyly.

Zrovna tak u materiálu PETG nelze spatřovat negativní trend ovlivnění meze pevnosti v tahu, hodnoty naměřené po 20 respektive 100 h UV záření mají naopak zvyšující se tendenci vzhledem k době expozice.

Mírný pokles meze pevnosti v tahu v závislosti na době záření vykazuje materiál ABS v případě výrobců Fillamentum a Plasty Mladeč, naopak u ABS Gembird k ovlivnění pevnosti nedošlo.

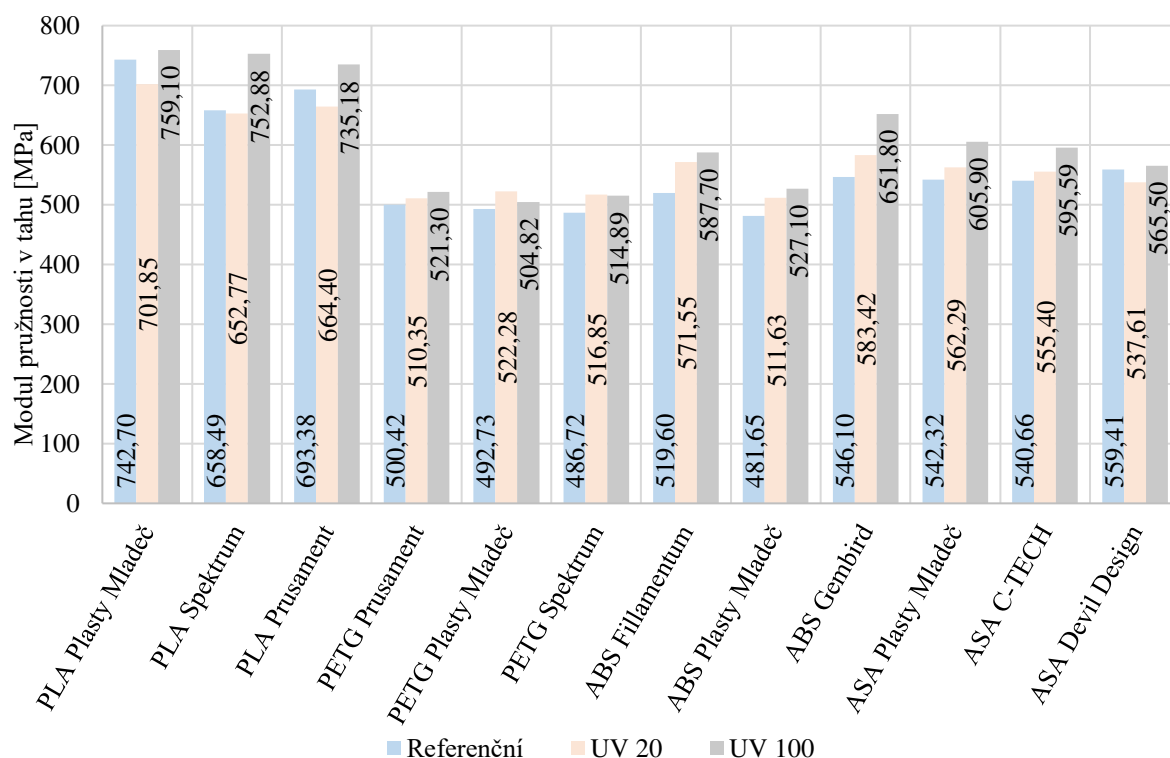
Obdobně je tomu taktéž u materiálu ASA, u kterého došlo k pouze mírnému poklesu meze pevnosti u materiálu od výrobců C-TECH a Devil Design po 100 h expozice, zatímco hodnoty po 20 h záření lze považovat za totožné s referenčními. U ASA od výrobce Plasty Mladeč nenastala změna meze pevnosti ani po delší době ozáření.



Obr. 5.2 Vliv UV záření na mez pevnosti v tahu.

Vliv UV záření na modul pružnosti v tahu lze hodnotit dle grafu na obr. 5.3. Z grafu je patrné, že u žádného z materiálů nedošlo k výraznému poklesu modulu pružnosti po vystavení UV záření. Naopak u většiny materiálů lze pozorovat spíše rostoucí tendenci modulu pružnosti.

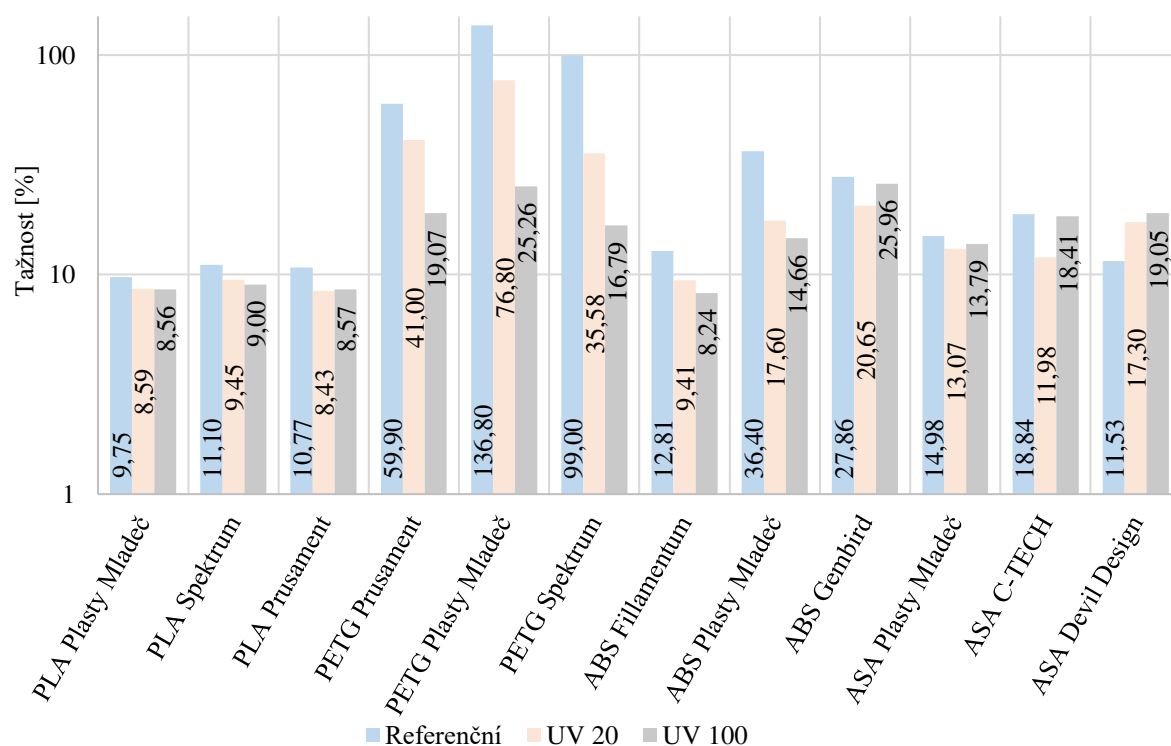
K poklesu došlo po 20 hodinách UV expozice u materiálu PLA všech výrobců a u ASA Devil Design, ovšem navýšením doby záření se negativní trend nepotvrdil a po 100 h naopak došlo k navýšení modulu pružnosti oproti referenční hodnotě. U ostatních materiálů je patrný nárůst modulu pružnosti v tahu, který je nejvýraznější v případě materiálu ABS Gembird.



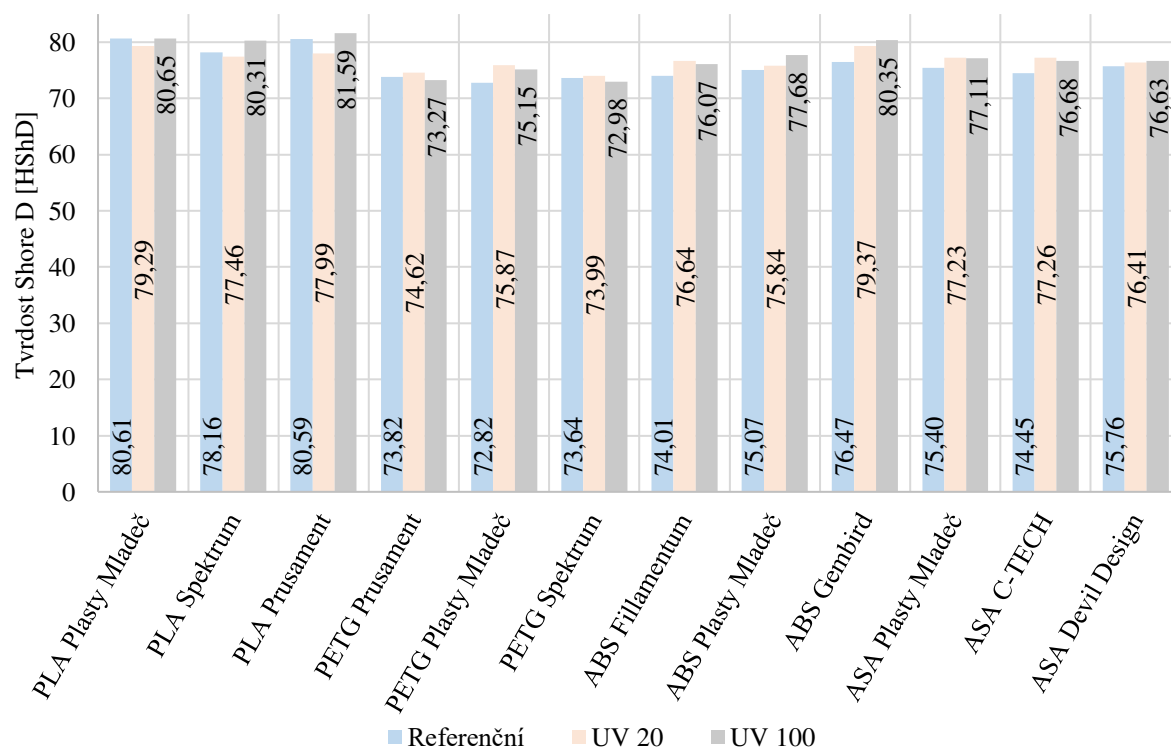
Obr. 5.3 Vliv UV záření na modul pružnosti v tahu.

Obr. 5.4 obsahuje graf s hodnotami tažnosti materiálu ovlivněnými expozicí UV záření. Vzhledem k značnému rozdílu hodnot mezi jednotlivými materiály je graf vykreslen v logaritmickém měřítku. U tažnosti materiálu je již ovlivnění UV zářením značnější, než tomu bylo u ostatních sledovaných vlastností stanovovaných zkouškou tahem. K poklesu tažnosti došlo u materiálu PLA, ABS i PETG, přičemž u PETG byl tento pokles nejmarkantnější. Pouze u materiálu ASA od výrobce Devil Design nebyl pozorován pokles tažnosti. Negativnímu trendu se vymykají také hodnoty u materiálů ABS Plasty Mladeč a Gembird, u kterých lze sice pozorovat mírný pokles oproti referenčním hodnotám, ovšem v porovnání s hodnotami po 20 h expozice se tažnost zvýšila. Obdobně tomu je i u materiálu ASA C-TECH, u něhož lze hodnotu po 100 h považovat za rovnou hodnotě referenční.

Hodnoty tvrdosti Shore D zobrazuje graf na obr. 5.5. U materiálu PLA lze pozorovat nevýrazný pokles tvrdosti po 20 h, ovšem statisticky lze považovat hodnoty u výrobců Plasty Mladeč a Spektrum za shodné s referenčními. Hodnoty tvrdosti po 100 h ozáření jsou pak totožné s referenčními (Plasty Mladeč) nebo mírně zvýšené (Spektrum, Prusament). Ke změně tvrdosti po ozáření nedošlo v případě materiálu PETG výrobců Prusament a Spektrum. Pro PETG výrobce Plasty Mladeč bylo zaznamenáno zvýšení tvrdosti, avšak hodnota po 20 a 100 hodinách expozice se neliší. U materiálu ABS všech výrobců došlo ke zvýšení tvrdosti v závislosti s dobou ozáření. K nárůstu tvrdosti došlo také u materiálu ASA výrobců Plasty Mladeč a C-TECH, zároveň však platí, hodnoty po 20 a po 100 hodinách ozáření jsou totožné. V případě ASA Devil Design změna tvrdosti materiálu dle Shore D nenastala.



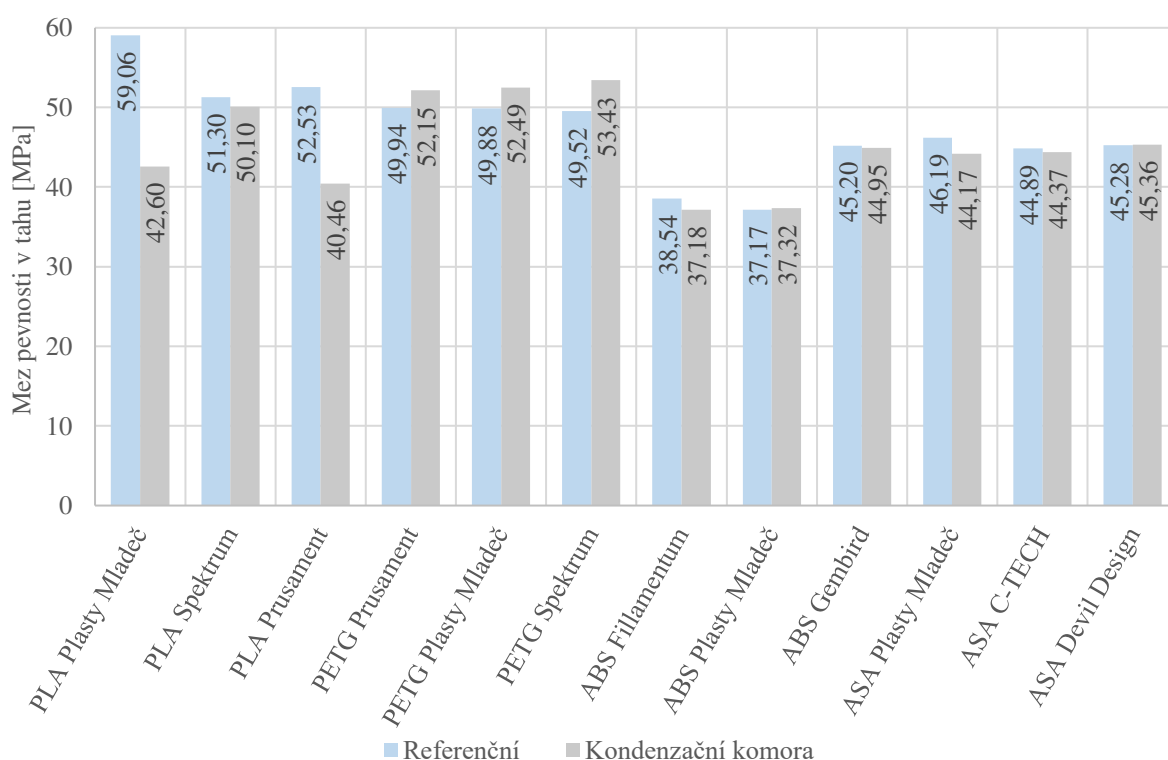
Obr. 5.4 Vliv UV záření na tažnost.



Obr. 5.5 Vliv UV záření na tvrdost Shore D.

5.3 Vliv umístění vzorků do kondenzační komory

Graf na obr. 5.6 zobrazuje vliv umístění vzorků do kondenzační komory na vlastnosti materiálu. Procentuální přírůstky hmotnosti vůči původní hmotnosti po umístění do kondenzační komory obsahuje tab. 5.4. U materiálu PLA od výrobce Spektrum nedošlo k ovlivnění meze pevnosti v tahu, jelikož hodnoty lze statisticky považovat za totožné. Naopak u PLA ostatních výrobců byl zaznamenán významný pokles meze pevnosti v tahu, což je výrazně odlišný výsledek než v případě PLA Spektrum. Materiál PETG od všech výrobců vykazuje naopak nárůst meze pevnosti. Mírný pokles meze pevnosti materiálu nastal u ABS Fillamentum, přičemž změna pevnosti pro ABS výrobců Gembird a Plasty Mladeč nenastala. K nevelkému poklesu meze pevnosti došlo také u materiálu ASA Plasty Mladeč a C-TECH. V případě ASA Devil Design mez pevnosti ovlivněna nebyla.

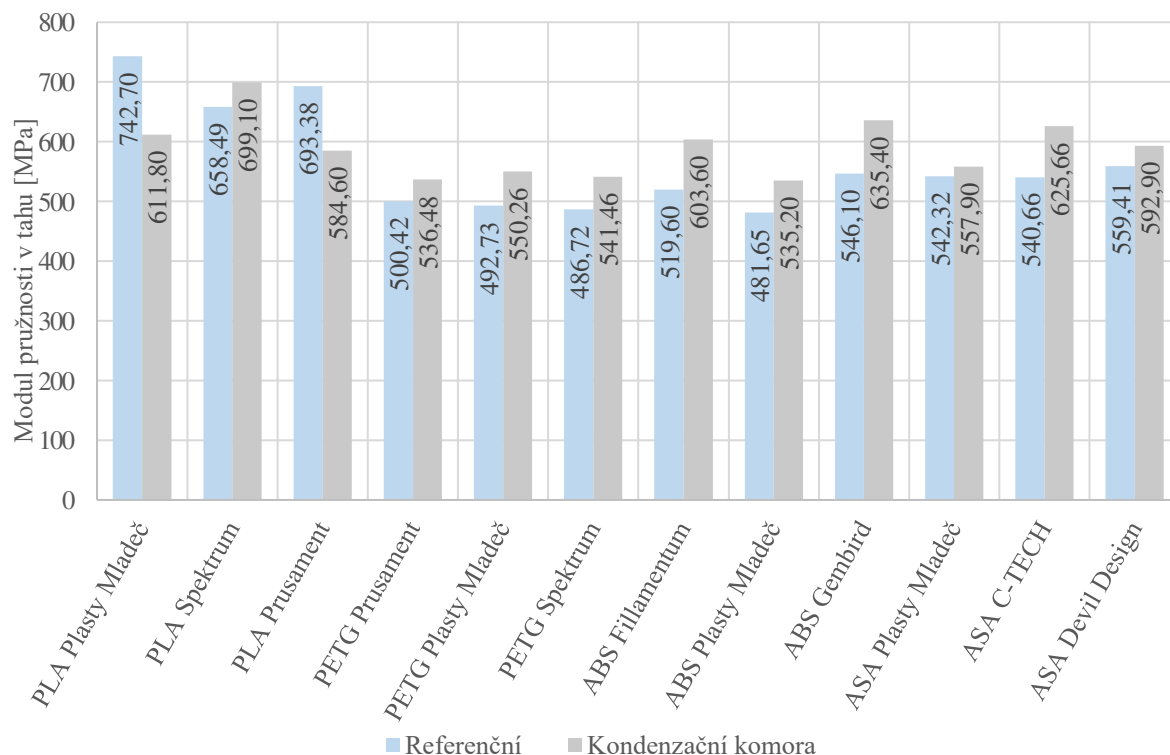


Obr. 5.6 Vliv umístění vzorků do kondenzační komory na mez pevnosti v tahu.

Tab. 5.4 Průměrný nárůst hmotnosti jednotlivých materiálů po 100h v kondenzační komoře.

Materiál	Výrobce	Nárůst hmotnosti	Materiál	Výrobce	Nárůst hmotnosti
PLA	Prusament	2,87 %	ABS	Fillamentum	1,13 %
	Plasty Mladeč	1,70 %		Gembird	0,87 %
	Spektrum	3,39 %		Plasty Mladeč	0,69 %
PETG	Prusament	1,02 %	ASA	C-TECH	1,18 %
	Plasty Mladeč	0,43 %		Devil Design	0,91 %
	Spektrum	1,13 %		Plasty Mladeč	0,84 %

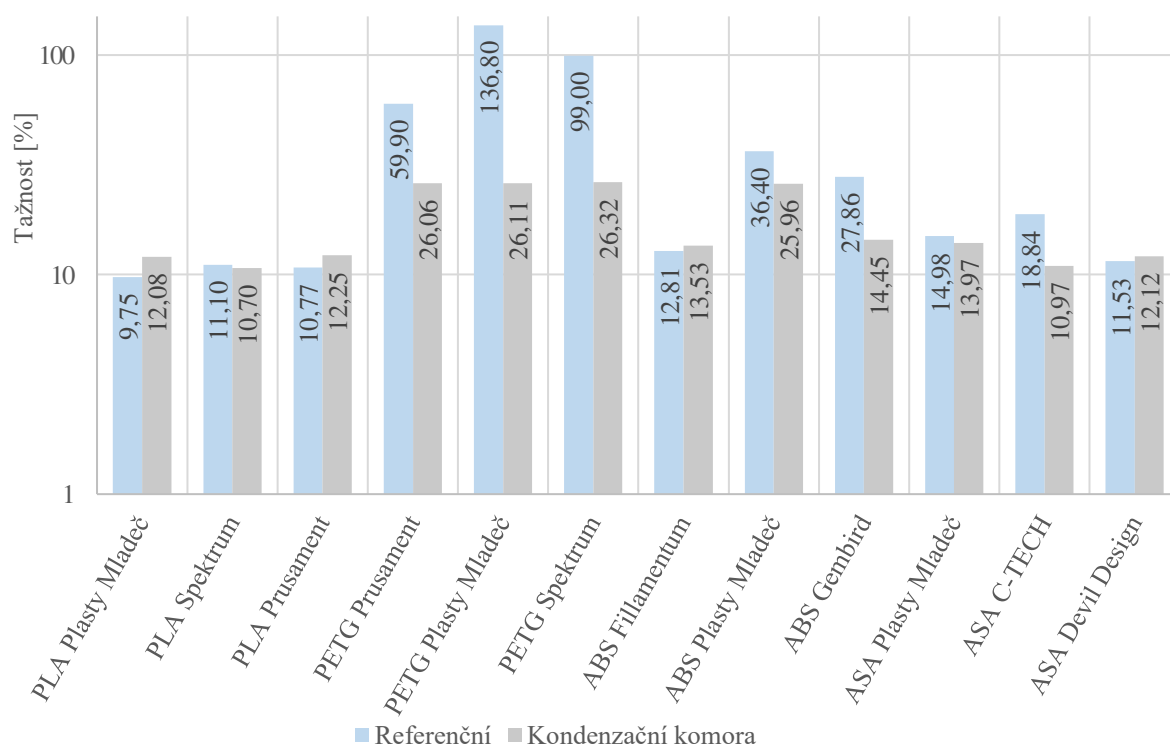
Ovlivnění modulu pružnosti v tahu po vystavení prostředí kondenzační komory znázorňuje graf na obr. 5.7. Obdobně jako tomu bylo u meze pevnosti, lze i u modulu pružnosti pozorovat rozdílné výsledky u materiálu PLA Spektrum, u kterého došlo k navýšení modulu pružnosti, oproti PLA výrobců Plasty Mladeč a Prusament, u kterých modul pružnosti naopak poklesl. Jednotný trend zvýšení modulu pružnosti po umístění vzorků do kondenzační komory lze pozorovat u materiálů PETG ABS a ASA, a to všech značek.



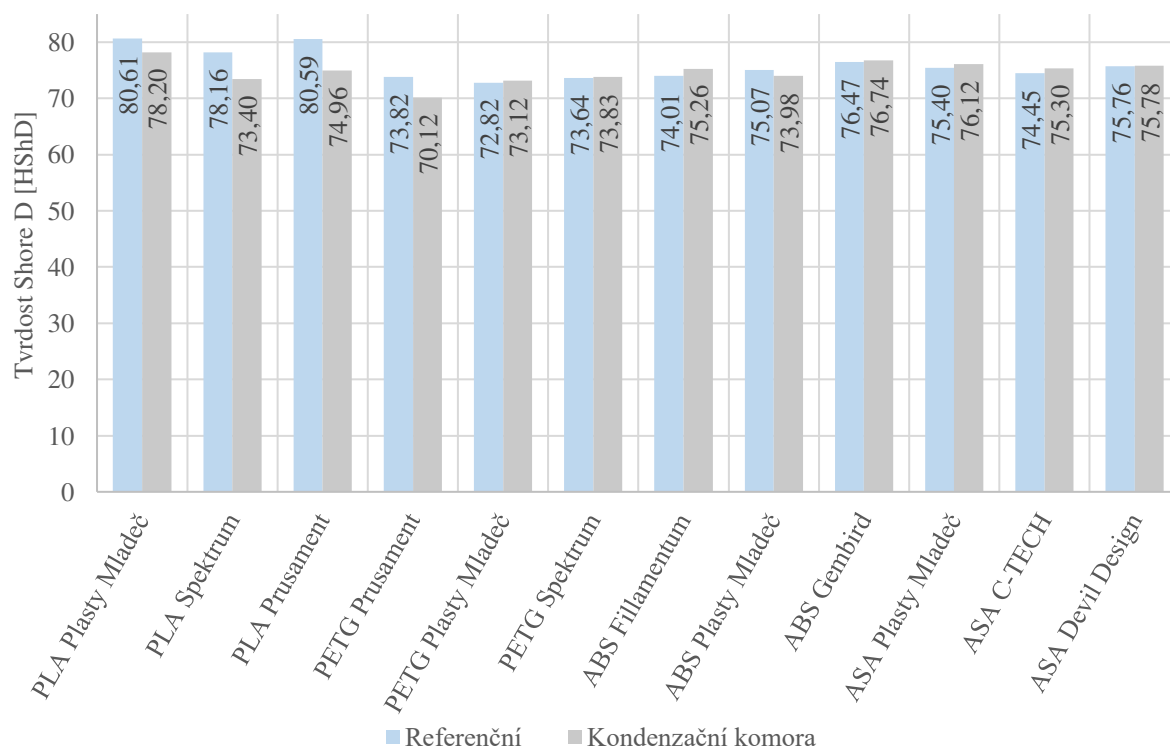
Obr. 5.7 Vliv umístění vzorků do kondenzační komory na modul pružnosti v tahu.

Z hodnot tažnosti, které zobrazuje graf na obr. 5.8, lze opět pozorovat rozlišnost PLA Spektrum v porovnání s PLA ostatních výrobců. U PLA Spektrum dle výsledku nedošlo ke změně tažnosti, zatímco u PLA Plasty Mladeč a Prusament se tažnost materiálu zvýšila. K výraznému poklesu tažnosti došlo u materiálu PETG všech výrobců, přičemž hodnoty tažnosti naměřené po vystavení vzorků prostředí kondenzační komory jsou pro jednotlivé výrobce totožné. Pokles tažnosti nastal také u materiálu ABS Plasty Mladeč a Gembird, zatímco u ABS Fillamentum tažnost ovlivněna nebyla. Obdobně je tomu i u materiálu ASA, u kterého lze pozorovat pokles tažnosti v případě výrobce C-TECH, na rozdíl od ASA výrobců Plasty Mladeč a Devil Design, u kterých se změna neprojevila.

Změnu tvrdosti Shore D po umístění vzorků do kondenzační komory znázorňuje graf na obr. 5.9. Z grafu je patrné, že u materiálu PLA všech výrobců došlo k poklesu tvrdosti. Pokles byl zaznamenán rovněž u materiálu PETG Prusament, u ostatních výrobců PETG nebyla tvrdost ovlivněna. Rozdílný vliv na tvrdost u jednotlivých výrobců byl pozorován u materiálu ABS – v případě výrobce Plasty Mladeč došlo k poklesu tvrdosti, u ABS Gembird tvrdost ovlivněna nebyla a u Fillamentum se hodnota zvýšila. U materiálu ASA došlo k navýšení tvrdosti u výrobců Plasty Mladeč a C-TECH, u výrobce Devil Design změna tvrdosti nenastala.



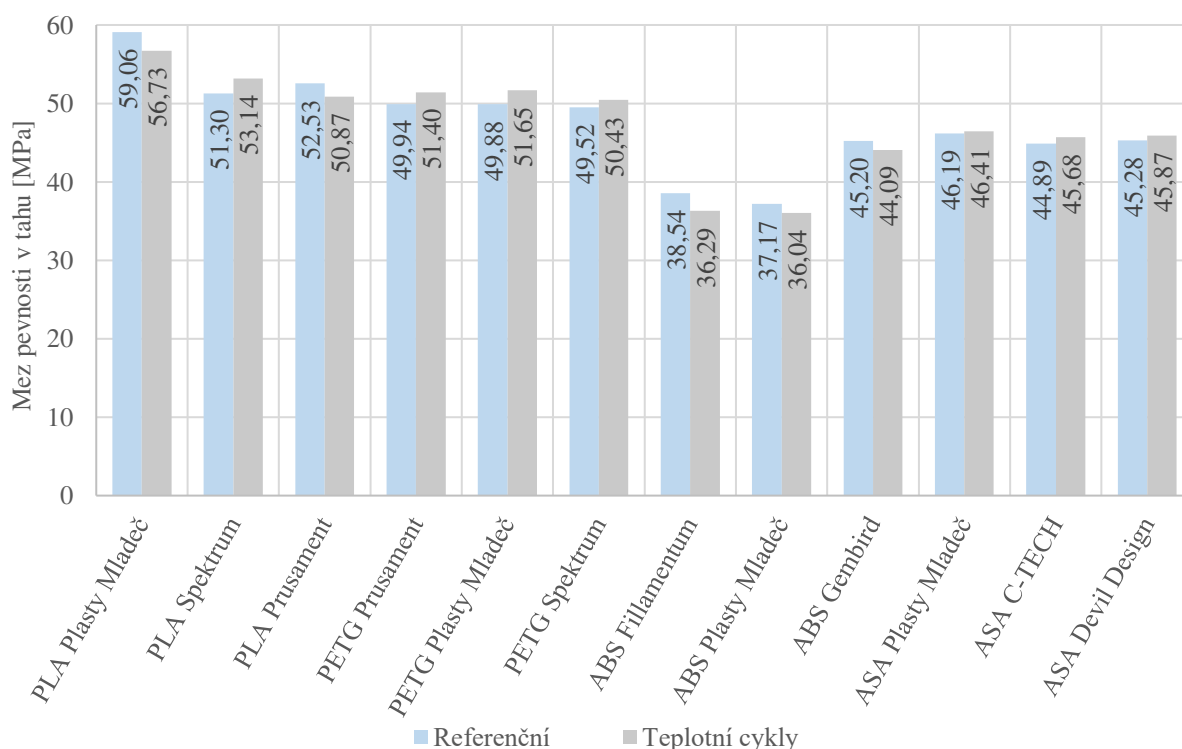
Obr. 5.8 Vliv umístění vzorků do kondenzační komory na tahnost.



Obr. 5.9 Vliv umístění vzorků do kondenzační komory na tvrdost Shore D.

5.4 Vliv teplotních cyklů

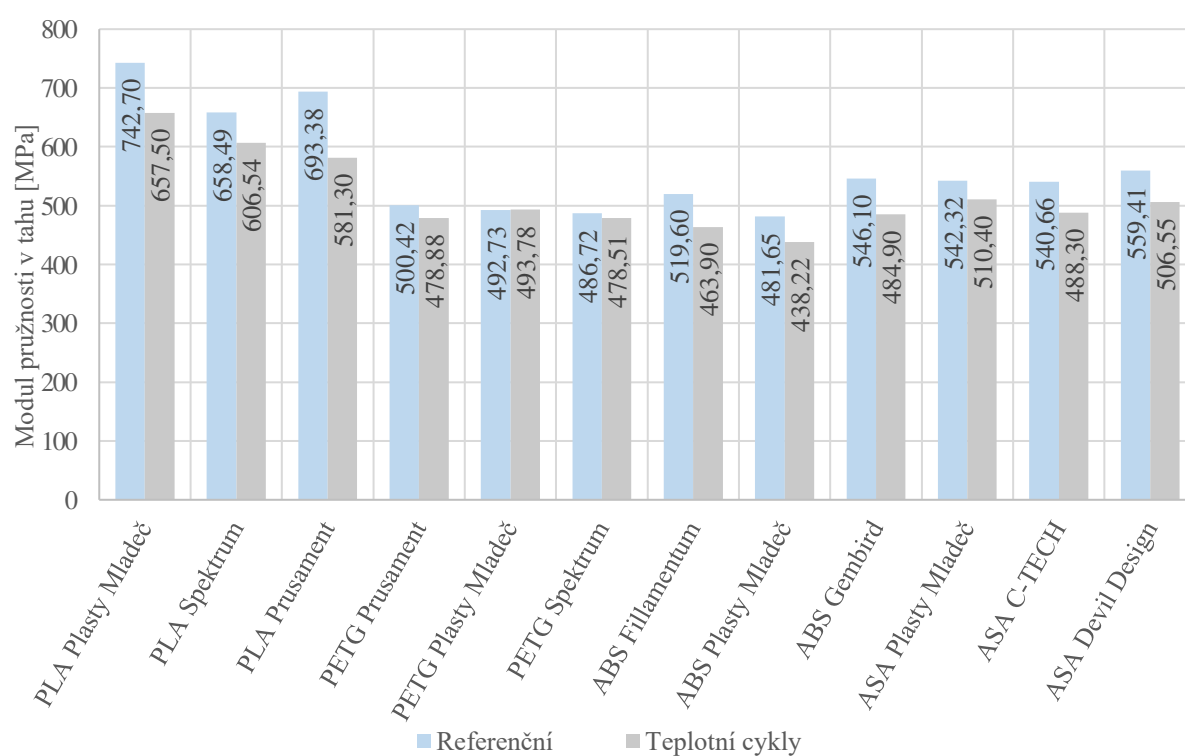
Vliv teplotních cyklů na mez pevnosti v tahu zachycuje graf na obr. 5.10. U PLA výrobců Plasty Mladeč a Prusament došlo po provedení FT teplotních cyklů k poklesu meze pevnosti, přičemž v případě PLA Spektrum došlo naopak k mírnému navýšení. Mírný nárůst meze pevnosti je možné pozorovat také u materiálu PETG, přičemž hodnoty PETG Spektrum lze dle statistiky považovat za totožné. Pokles meze pevnosti v tahu je patrný u materiálu ABS, a to pro všechny výrobce. V případě materiálu ASA nedošlo k zásadnímu ovlivnění meze pevnosti ani u jednoho z výrobců a hodnoty po podstoupení teplotních cyklů lze považovat za shodné s referenčními.



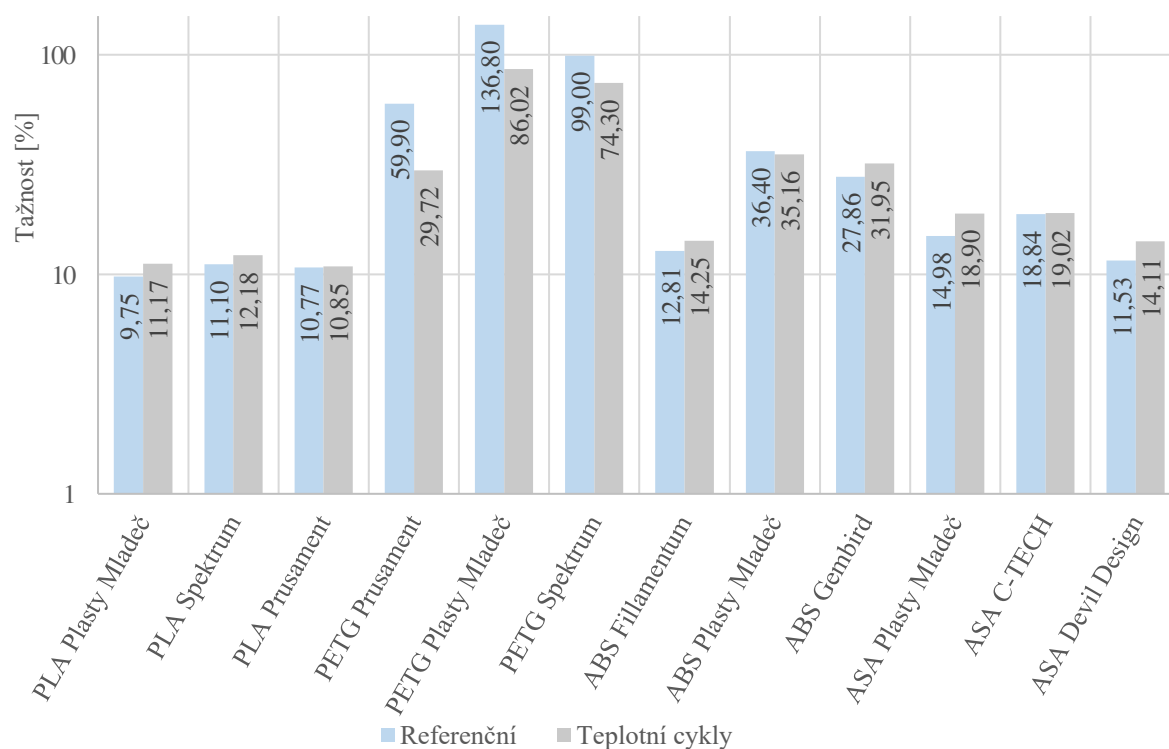
Obr. 5.10 Vliv teplotních cyklů na mez pevnosti v tahu.

V případě modulu pružnosti v tahu (graf na obr. 5.11) došlo u materiálu PLA k poklesu u všech výrobců. Pro materiál PETG došlo k poklesu pouze u výrobce Prusament, pro zbylé dva případy nedošlo k ovlivnění hodnot teplotním cyklováním. U materiálu ABS i ASA lze pozorovat pokles modulu pružnosti v tahu vlivem teplotních cyklů, který je patrný u všech testovaných výrobců.

Tažnost materiálu po teplotním cyklování hodnotí graf na obr. 5.12. U materiálu PLA došlo u výrobce Plasty Mladeč k mírnému navýšení tažnosti, pro zbylé dva výrobce hodnota tažnosti ovlivněna nebyla. U PETG všech výrobců je patrný pokles tažnosti po absolvování teplotních cyklů. V případě materiálu ABS lze na základě testu Anova prohlásit, že teplotní cyklování tažnost neovlivnilo, a to u žádného z výrobců. Zrovna tak tažnost materiálu ASA výrobce C-TECH ovlivněna nebyla, u zbylých dvou výrobců ASA došlo k navýšení tažnosti materiálu.

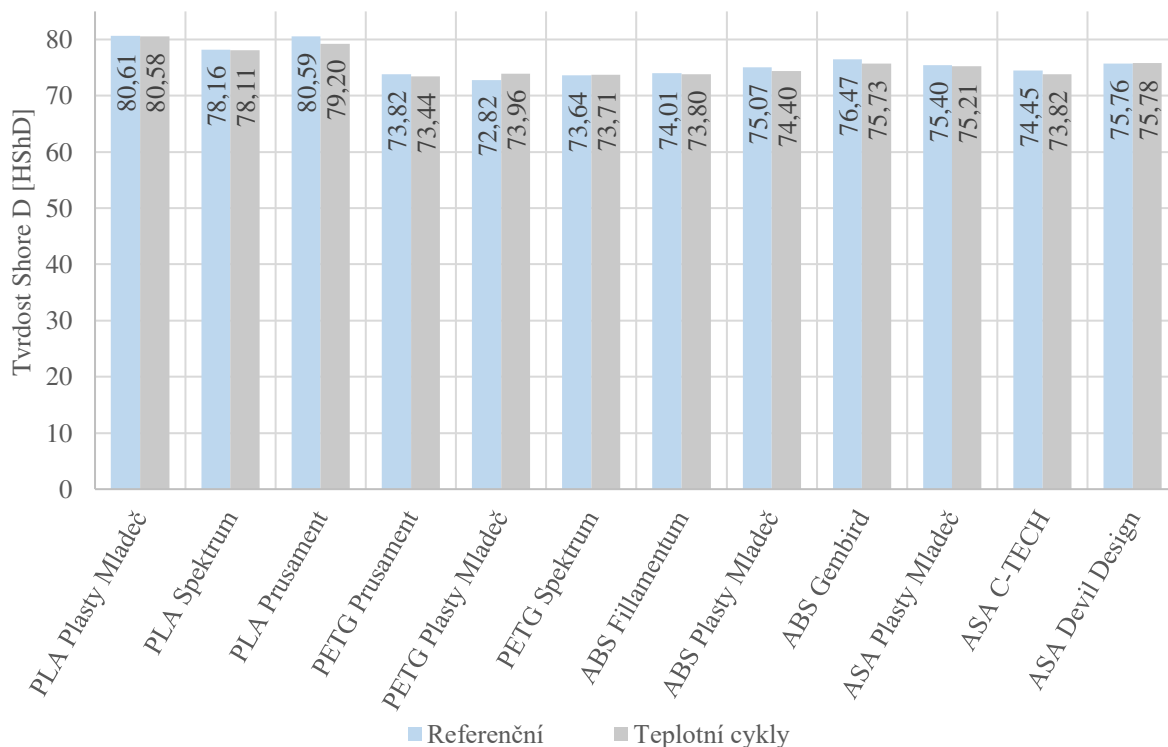


Obr. 5.11 Vliv teplotních cyklů na modul pružnosti v tahu.



Obr. 5.12 Vliv teplotních cyklů na tažnost.

Z grafu na obr. 5.13 lze usuzovat, že k výraznému ovlivnění tvrdosti materiálu teplotními cykly nedošlo, což potvrzuje i provedení testů Anova, dle nichž se tvrdost většiny materiálů po cyklování v porovnání s referenčními hodnotami nezměnila. Výjimkou jsou pouze materiály PLA Prusament, u něhož došlo k mírnému poklesu tvrdosti, a PETG Plasty Mladeč, u kterého je patrné naopak mírné navýšení tvrdosti materiálu dle Shore D.

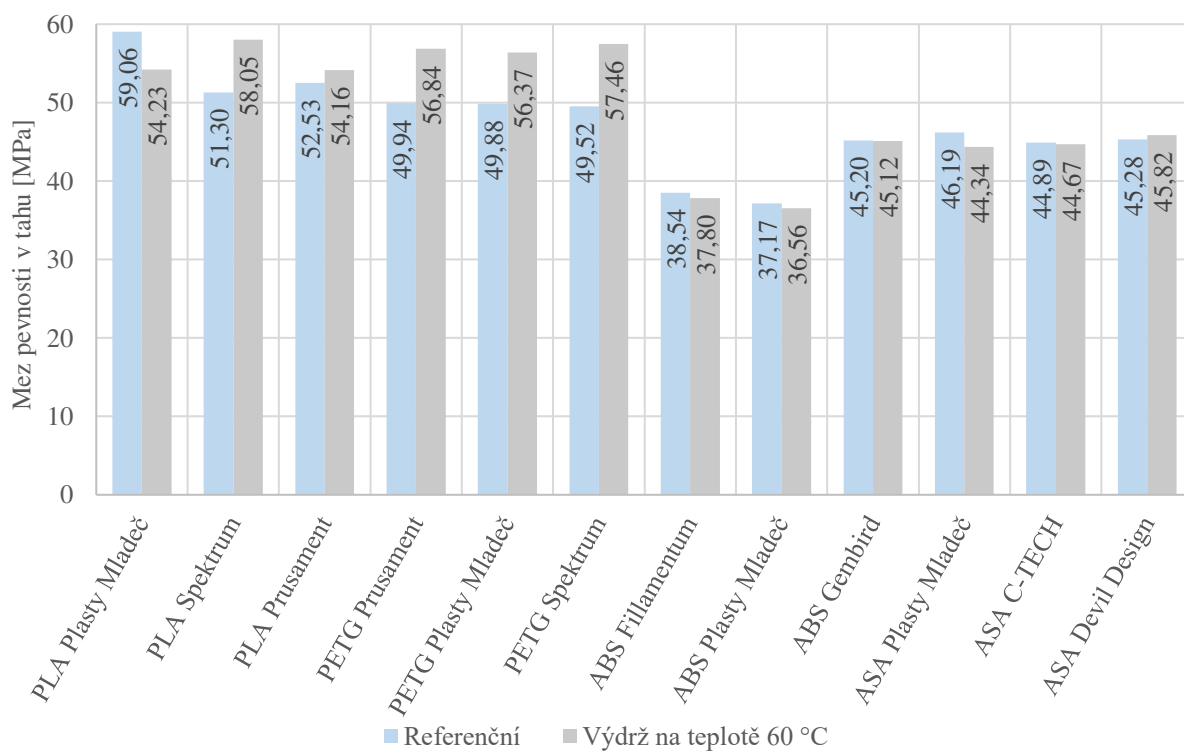


Obr. 5.13 Vliv teplotních cyklů na tvrdost Shore D.

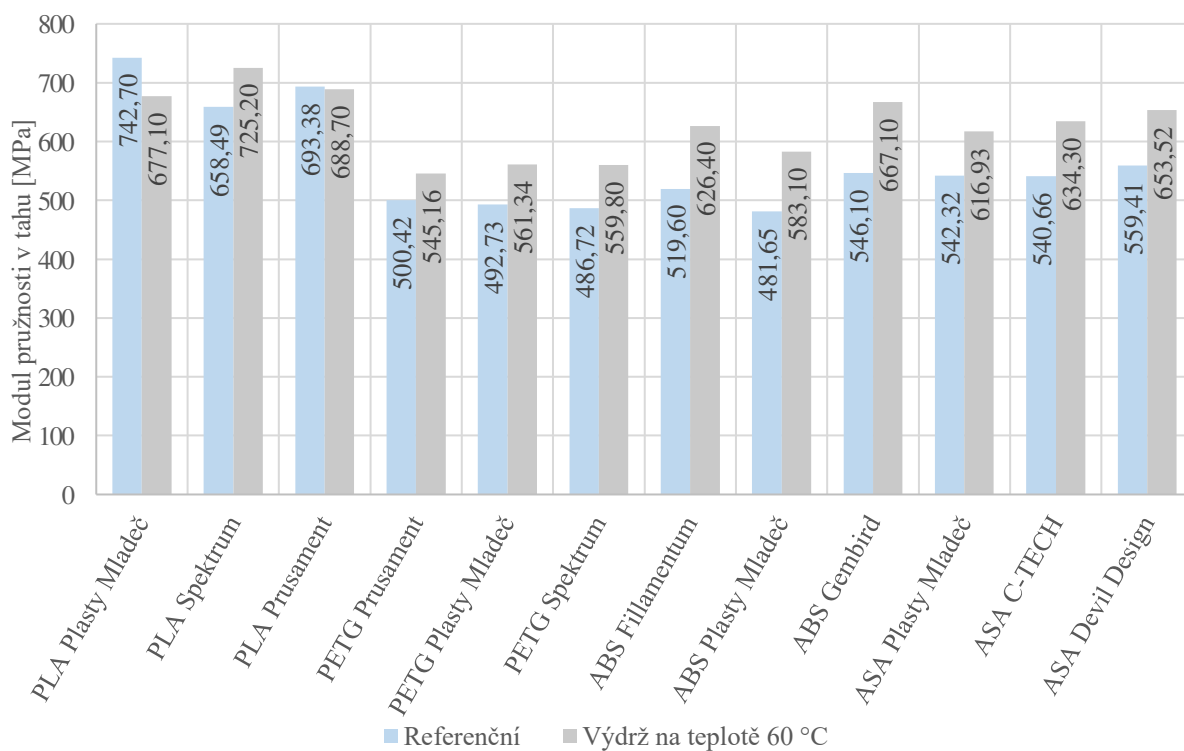
5.5 Vliv výdrže na teplotě 60 °C

Ovlivnění meze pevnosti v tahu umístěním vzorků do pece o teplotě 60 °C zobrazuje graf na obr. 5.14. Z grafu je patrné, že došlo k rozdílným výsledkům mezi výrobci u materiálu PLA – u PLA Plasty Mladeč mez pevnosti v tahu klesla, zatímco v případě PLA značek Spektrum a Prusament se mez pevnosti navýšila. Jednotný trend v rámci všech značek je patrný pro materiál PETG, u všech výrobců lze pozorovat obdobný nárůst meze pevnosti v tahu. Mírný pokles meze pevnosti nastal u materiálu ABS výrobců Filamentum a Plasty Mladeč. V případě ABS značky Gembird k ovlivnění meze pevnosti nedošlo. Obdobně u ASA Plasty Mladeč došlo k poklesu meze pevnosti, zatímco u ostatních výrobců C-TECH a Devil Design lze hodnoty považovat za totožné s referenčními.

Rozdílné ovlivnění zvýšenou teplotou lze pozorovat u materiálu PLA také u modulu pružnosti v tahu, jak znázorňuje graf na obr. 5.15. U PLA Plasty Mladeč došlo k poklesu modulu pružnosti v tahu, u PLA výrobce Spektrum naopak k nárůstu a pro PLA Prusament k ovlivnění hodnoty nedošlo. U všech ostatních materiálů nehledě na výrobce je patrný nárůst modulu pružnosti v tahu vlivem působení zvýšené teploty.

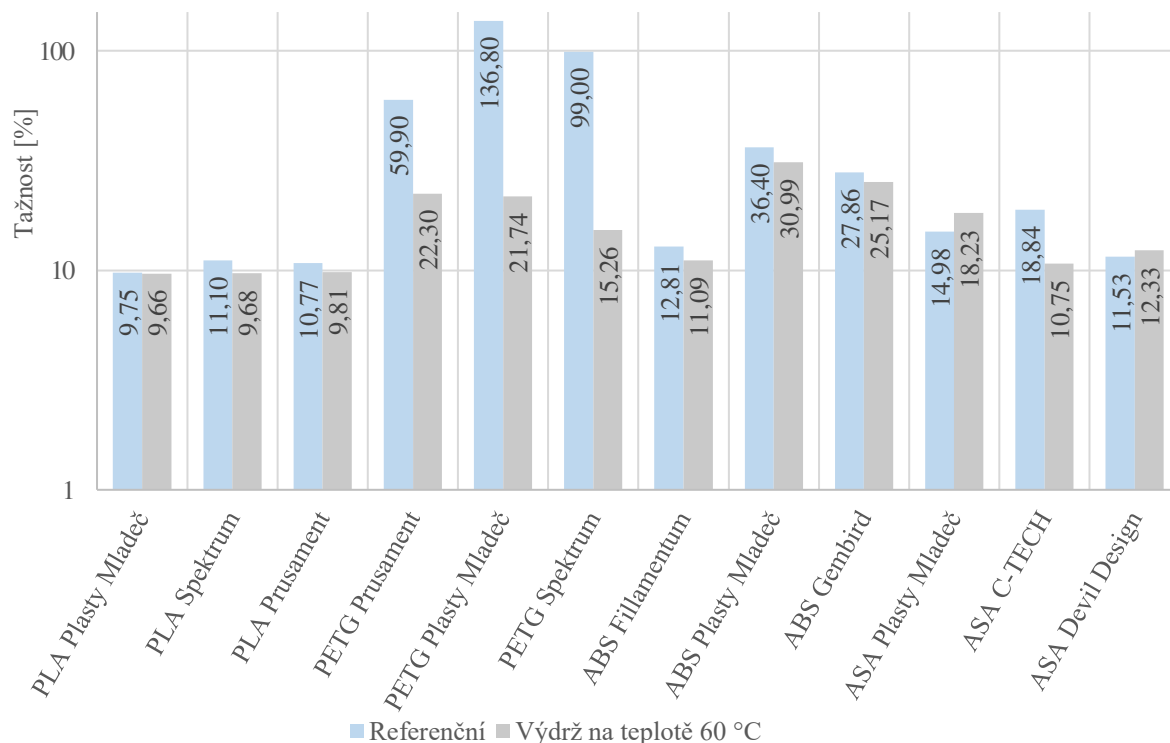


Obr. 5.14 Vliv výdrže na teplotě 60 °C na mez pevnosti v tahu.



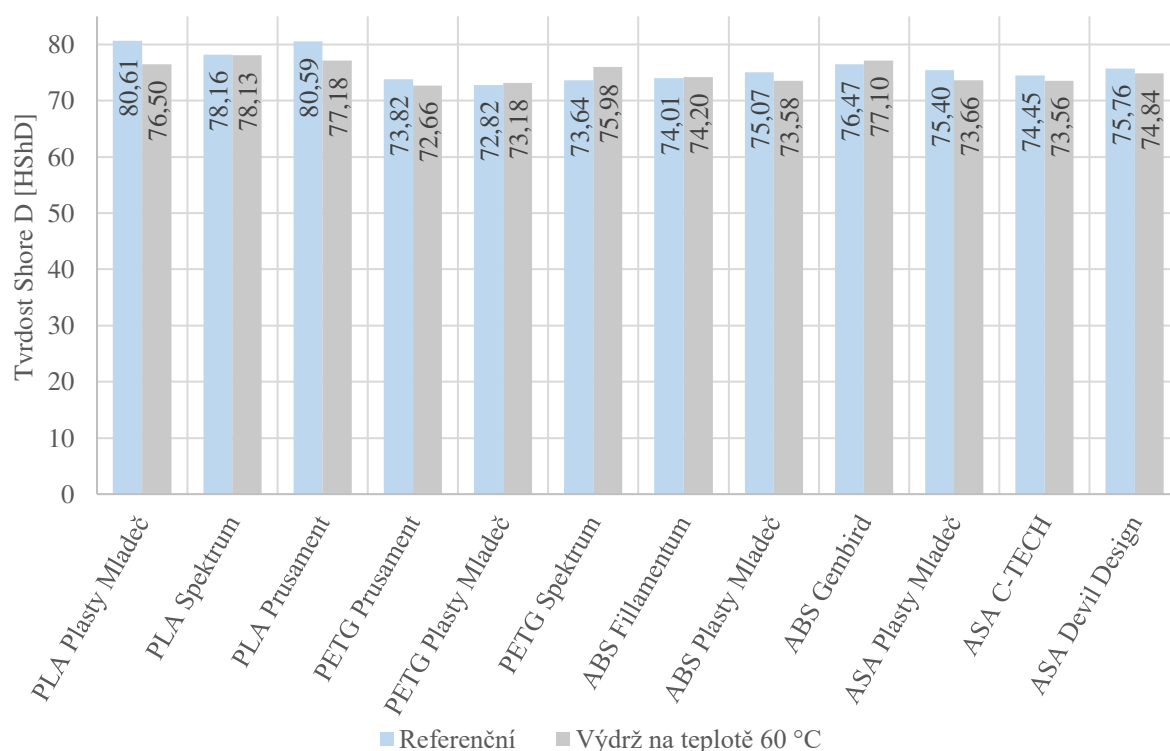
Obr. 5.15 Vliv výdrže na teplotě 60 °C na modul pružnosti v tahu.

Jak lze vyčíst z grafu na obr. 5.16, nedošlo v případě materiálu PLA k výraznému ovlivnění tažnosti výdrží na teplotě 60 °C. U výrobců Plasty Mladeč a Prusament lze hodnoty prohlásit za shodné s referenčními, pouze u PLA Spektrum nastal mírný pokles. K významnému snížení tažnosti ovšem došlo v případě materiálu PETG, a to u všech značek. Pokles, ačkoliv již ne tak výrazný, lze pozorovat také u ABS všech výrobců. Co se týká materiálu ASA, vymyká se ASA výrobce C-TECH, u kterého byl zaznamenán značný pokles tažnosti, zatímco u ASA výrobců Plasty Mladeč a Devil Design došlo naopak k mírnému nárůstu.



Obr. 5.16 Vliv výdrže na teplotě 60 °C na tažnost.

Tvrдость materiálu Shore D a její ovlivnění výdrží na teplotě 60 °C sleduje graf na obr. 5.17. Z výsledků je patrné, že zatímco u PLA výrobců Plasty Mladeč a Prusament došlo k poklesu tvrdosti, pro PLA Spektrum změna nenastala. Rozdíly mezi výrobcí lze pozorovat také u materiálu PETG – v případě značky Prusament tvrdost klesla, u Plasty Mladeč nebyla tvrdost ovlivněna a u výrobce Spektrum se zvýšila. Pokles tvrdosti nastal u ABS Plasty Mladeč, v případě ostatních výrobců ABS se tvrdost vlivem působení zvýšené teploty nezměnila. Obdobný výsledek lze pozorovat u materiálu ASA, kdy tvrdost klesla v případě výrobců Plasty Mladeč a C-TECH, zatímco u Devil Design tvrdost ovlivněna nebyla.

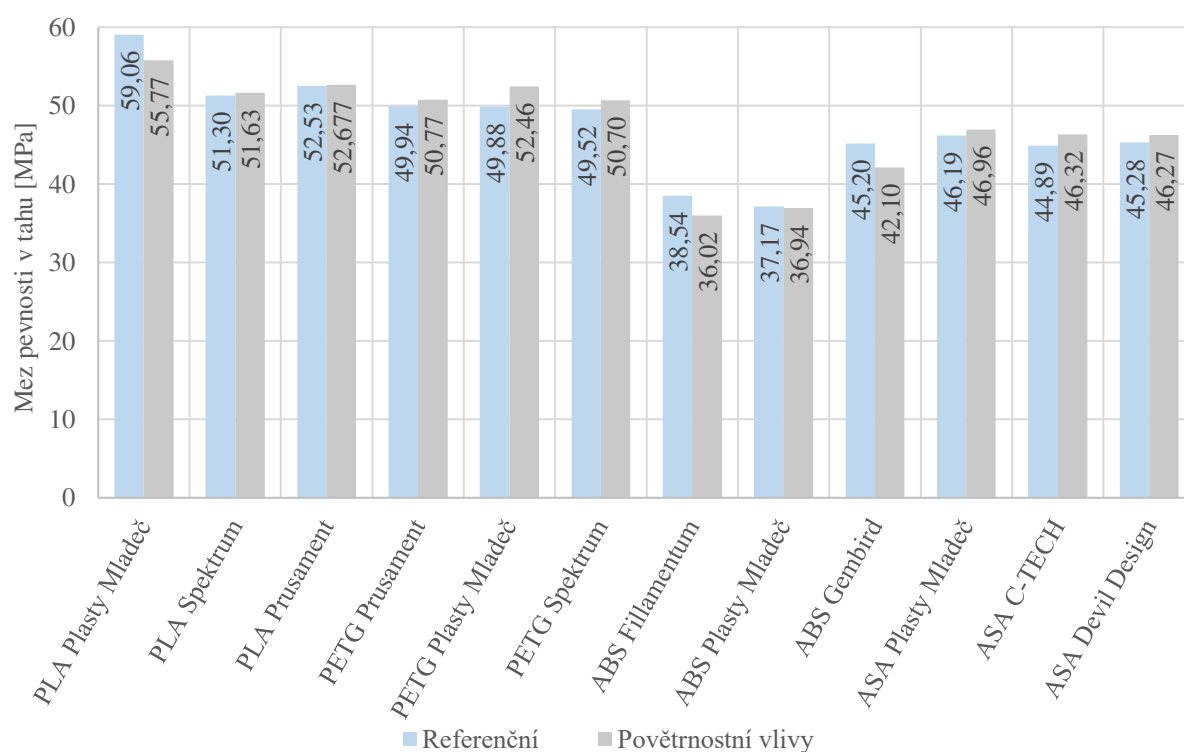


Obr. 5.17 Vliv výdrže na teplotě 60 °C na tvrdost Shore D.

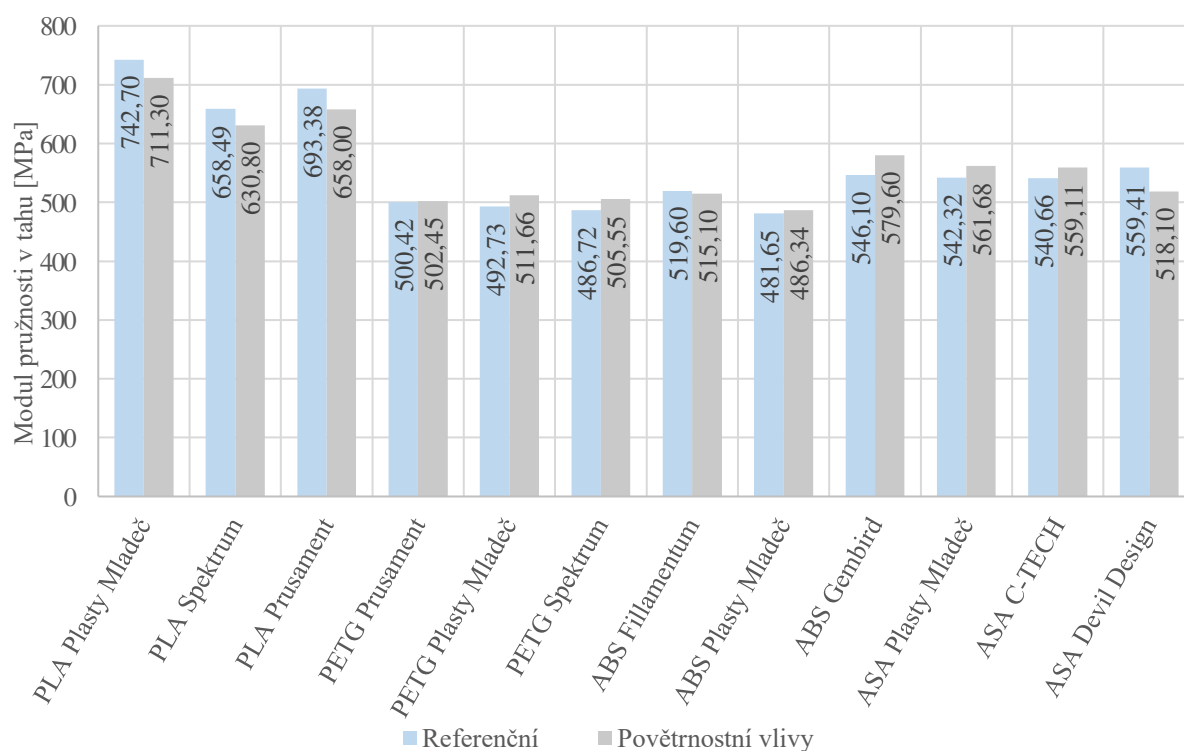
5.6 Vliv povětrnostních podmínek

Mez pevnosti v tahu a její ovlivnění vystavení vzorků povětrnostním vlivům zobrazuje graf na obr. 5.18. V případě materiálu PLA, došlo k poklesu meze pevnosti pouze u PLA značky Plasty Mladeč, zatímco u zbývajících výrobců mez pevnosti v tahu ovlivněna nebyla. U materiálu PETG je patrný nárůst meze pevnosti, a to u značek Prusament a Plasty Mladeč. K ovlivnění meze pevnosti v tahu materiálu PETG Spektrum nedošlo. Změna nenastala ani u ABS Plasty Mladeč, zatímco pro ABS ostatních výrobců lze na mezi pevnosti v tahu pozorovat pokles.

Výrazné ovlivnění modulu pružnosti v tahu z grafu na obr. 5.19 není patrné. Modul pružnosti v tahu materiálu PLA nebyl povětrnostními vlivy ovlivněn ani v jednom případě, hodnoty lze považovat za shodné s referenčními. Mírný nárůst modulu nastal v případě PETG Plasty Mladeč a Spektrum, u posledního z výrobců PETG Prusament ovšem ke změně nedošlo. Nevýznamný vliv povětrnostních podmínek na modul pružnosti potvrzují také výsledky pro materiál ABS, v jehož případě nedošlo ke změně modulu pružnosti u žádného z výrobců. Obdobně je na tom i materiál ASA, k mírnému poklesu došlo pouze pro ASA Devil Design. Modul pružnosti v tahu ASA ostatních výrobců nebyl ovlivněn.

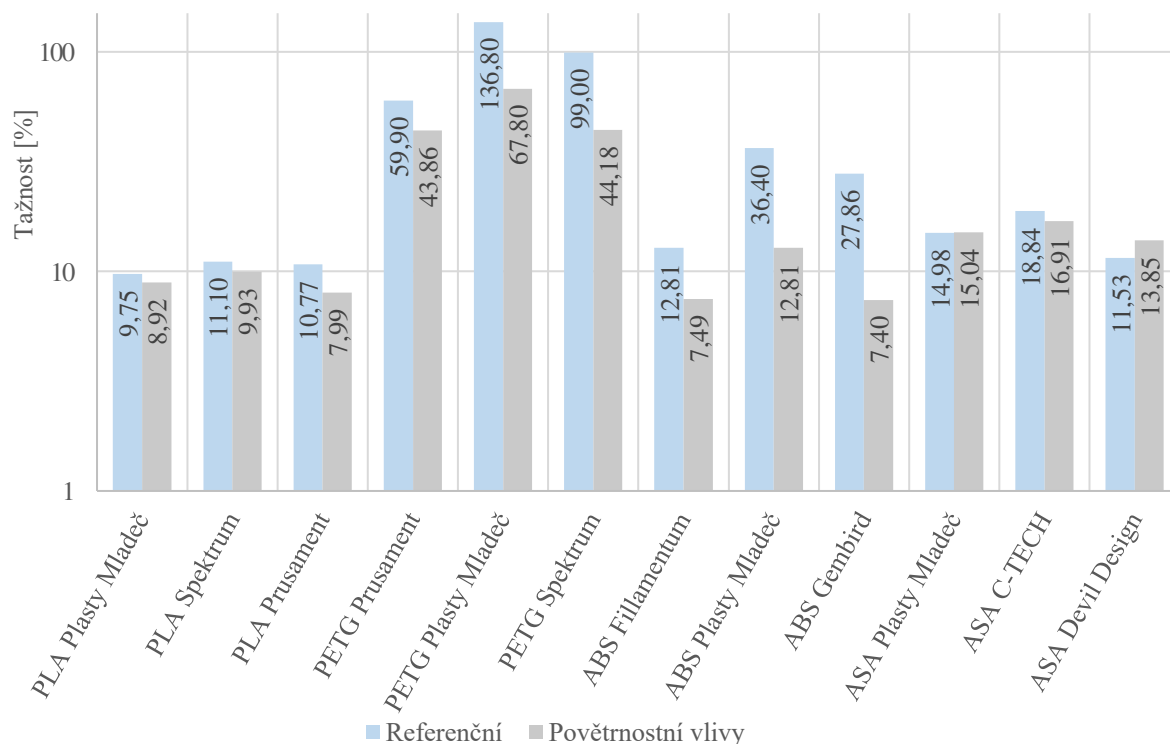


Obr. 5.18 Vliv povětrnostních vlivů na mez pevnosti v tahu.



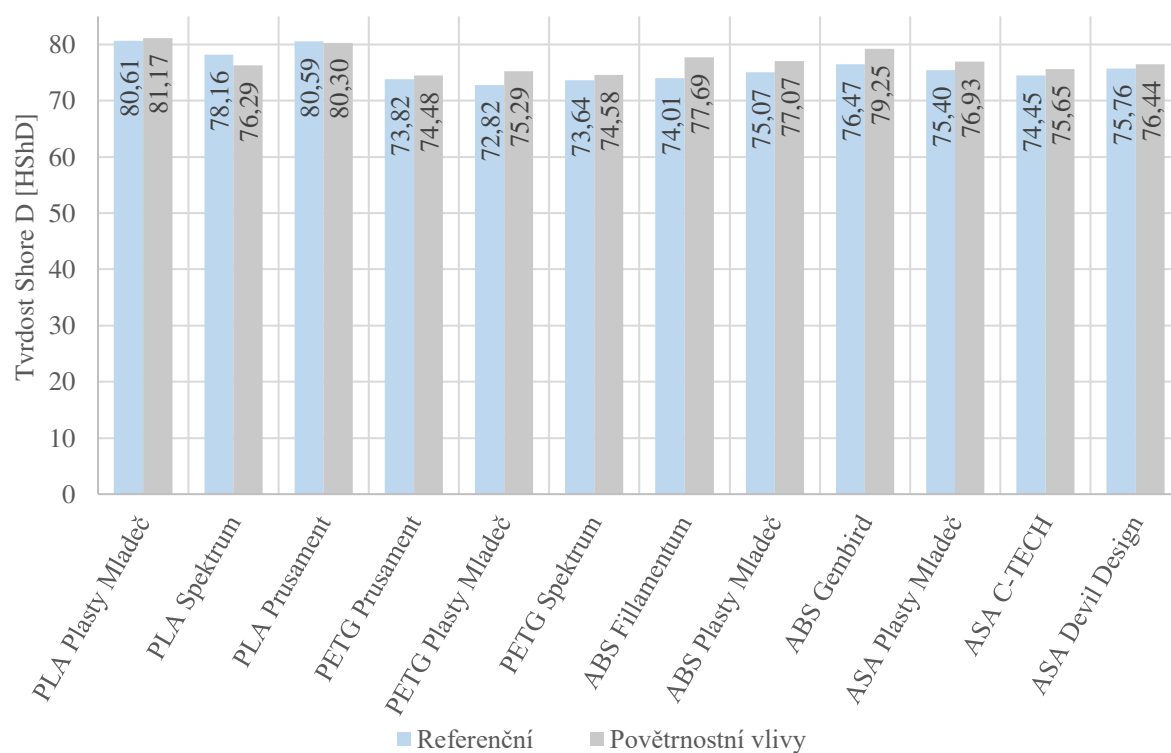
Obr. 5.19 Vliv povětrnostních vlivů na modul pružnosti v tahu.

Graf na obr. 5.20 hodnotí vliv povětrnostních podmínek na tažnost materiálu. Z grafu lze usuzovat, že tažnost je, až na materiál ASA, povětrnostními vlivy ovlivněna negativně. Pokles je patrný u materiálů PLA, PETG i ABS všech výrobců. V případě PLA se nejedná o značný propad, ale u PETG a ABS je již pokles oproti původním hodnotám výraznější. Mírný pokles je patrný také u materiálu ASA C-TECH, u ostatních výrobců ASA k ovlivnění tažnosti nedošlo.



Obr. 5.20 Vliv povětrnostních vlivů na tažnost.

Tvrdot materiálu a její ovlivnění povětrnostními vlivy shrnuje graf na obr. 5.21. Z výsledků nelze pozorovat výrazné ovlivnění tvrdosti. K poklesu došlo v případě PLA od výrobce Spektrum. Pro PLA zbývajících výrobců lze prohlásit, že k ovlivnění tvrdosti dle Shore D nedošlo. Změna nenastala ani u PETG Prusament a Spektrum, u nichž lze rovněž hodnoty považovat za totožné s referenčními. U PETG Plasty Mladeč došlo k mírnému nárůstu. Zvýšení tvrdosti zrovna tak nastalo v případě materiálů ABS a ASA všech výrobců, ovšem jedná se pouze o mírný nárůst způsobený vystavením povětrnostním vlivům.



Obr. 5.21 Vliv povětrnostních vlivů na tvrdost Shore D.

6 DISKUZE

Tato část obsahuje zhodnocení výsledků dosažených v experimentální části. Hodnotí rozdíly mezi výrobcí jednotlivých materiálů a dále porovnává materiály mezi sebou. Kapitola je ukončena doporučením pro uživatele 3D tisku.

6.1 Zhodnocení jednotlivých degradačních vlivů

UV zářením došlo k významnému ovlivnění mechanických vlastností pouze v případě tažnosti, která se snížila u většiny materiálů. Nepotvrdil se předpoklad poklesu meze pevnosti v tahu, který se projevil pouze mírně u materiálu ABS. Důvodem může být nedostatečná intenzita či nízká doba ozáření. Zatímco u modulu pružnosti došlo téměř u všech materiálů k mírnému nárůstu, tvrdost zjevně ovlivněna nebyla.

K propadu meze pevnosti po vystavení vzorků prostředí kondenzační komory došlo pouze u materiálu PLA, v ostatních případech ke značnému ovlivnění nedošlo. U modulu pružnosti je až na materiál PLA patrný mírný nárůst. Vlivem absorpce vody byl na základě rešerše očekáván nárůst tažnosti, což se ovšem nepotvrdilo – k mírnému nárůstu došlo pouze u materiálu PLA, v případě PETG naopak značně klesla. Pokles nebo nezměněné hodnoty tažnosti bylo možné pozorovat i u všech ostatních materiálů. V případě tvrdosti bylo možné pozorovat mírný pokles u materiálu PLA, u ostatních k ovlivnění tvrdosti nedošlo.

Změnu vlastností po vystavení teplotním FT cyklům nešlo vzhledem k nedostatku obdobných studií pro aplikované materiály predikovat. Mez pevnosti mírně klesla u materiálů PLA a ABS, naopak u PETG a ASA nebyla negativně ovlivněna. Pokles byl zaznamenán rovněž u modulu pružnosti v tahu, a to u všech materiálů. Tažnost klesla pouze v případě PETG, u ostatních materiálů došlo buď k mírnému navýšení, nebo hodnota ovlivněna nebyla. Ke změně tvrdosti vlivem FT cyklů nedošlo.

Předpokládaný zlepšující se trend mechanických vlastností se potvrdil po umístění vzorků do pece o teplotě 60 °C. U některých z materiálů došlo k navýšení meze pevnosti, u dalších hodnota ovlivněna nebyla. Vyjma materiálu PLA je patrný rovněž nárůst modulu pružnosti v tahu. Materiál PLA je zároveň jediný, u kterého se neprojevil pokles tažnosti. Tvrdost významným způsobem ovlivněna nebyla.

Z porovnání výsledků po umístění do kondenzační komory (55 °C a 100 % vlhkost) s výsledky po umístění vzorků do pece o teplotě 60 °C je zároveň možné odhadovat vliv vlhkosti – patrná je nižší mez pevnosti v tahu a nižší hodnoty modulu pružnosti v tahu, na tažnosti a tvrdosti se vliv vlhkosti značně neprojevil.

K výraznému poklesu mechanických vlastností nedošlo po vystavení vzorků povětrnostním vlivům. Na hodnotách meze pevnosti a modulu pružnosti nelze pozorovat výrazné ovlivnění. Mírný pokles byl zaznamenán v případě tažnosti, a to především u materiálů PETG a ABS. K ovlivnění tvrdosti značným způsobem opět nedošlo.

6.2 Porovnání dosažených výsledků mezi výrobcí jednotlivých materiálů

Podkapitola rozebírá rozdílnost dosažených výsledků mezi různými výrobcí konkrétních testovaných materiálů.

6.2.1 Porovnání výsledků mezi výrobci – materiál PLA

Porovnání výsledků jednotlivých výrobců shrnuje tab. 6.1. Již na referenčních hodnotách lze pozorovat rozdíly – nejvyšší meze pevnosti dosáhl materiál PLA Plasty Mladeč, hodnoty Spektrum a Prusament se již příliš neliší. Obdobně nejvyšší modul pružnosti v základním stavu vykazoval PLA Plasty Mladeč, zde je patrný rozdíl také mezi filamenti Prusament a Spektrum. V případě tažnosti je na tom naopak PLA Plasty Mladeč nejhůře. Nejnižší tvrdost byla změřena u PLA Spektrum, zatímco hodnoty pro Plasty Mladeč a Prusament jsou téměř totožné.

V případě UV záření se vliv na hodnoty neliší. Výsledky potvrzují obdobný trend poklesu (nárůstu) a liší se pouze v hodnotách konkrétních úbytků (nárůstů).

U ovlivnění umístěním do kondenzační komory již lze pozorovat značné rozdíly mezi výrobci. Zatímco u Plasty Mladeč a Prusament došlo k výraznému poklesu meze pevnosti, v případě Spektrum nastal pokles podstatně mírnější. Rozdílnost potvrzuje rovněž ovlivnění modulu pružnosti a zrovna tak i výsledky tažnosti materiálu. V případě tvrdosti už je trend (pokles) jednotný.

Tab. 6.1 Porovnání výsledků mezi jednotlivými výrobci – materiál PLA.

PLA	Výrobce	Referenční sada	UV 20 h	UV 100 h	Kondenzační komora	Teplotní cykly	Výdrž na teplotě 60 °C	Povětrnostní vlivy
Mez pevnosti v tahu [MPa]	Plasty Mladeč	59,06	54,87	58,81	42,60	56,73	54,23	55,77
	Spektrum	51,30	50,98	59,79	50,10	53,14	58,05	51,63
	Prusament	52,53	51,12	55,99	40,46	50,87	54,16	52,68
Modul pružnosti v tahu [MPa]	Plasty Mladeč	742,70	701,85	759,10	611,80	657,50	677,10	711,30
	Spektrum	658,49	652,77	752,88	699,10	606,54	725,20	630,80
	Prusament	693,38	664,40	735,18	584,60	581,30	688,70	658,00
Tažnost [%]	Plasty Mladeč	9,75	8,59	8,56	12,08	11,17	9,66	8,92
	Spektrum	11,10	9,45	9,00	10,70	12,18	9,68	9,93
	Prusament	10,77	8,43	8,57	12,25	10,85	9,81	7,99
Tvrdost [HShD]	Plasty Mladeč	80,61	79,29	80,65	78,20	80,58	76,50	81,17
	Spektrum	78,16	77,46	80,31	73,40	78,11	78,13	76,29
	Prusament	80,59	77,99	81,59	74,96	79,20	77,18	80,30

Obdobně jako u kondenzační komory, panují rozdíly také ve výsledcích po podstoupení teplotních cyklů. V případě meze pevnosti a tažnosti došlo u Spektrum ke zlepšení, na rozdíl od ostatních výrobců, u kterých nastal naopak pokles. Modul pružnosti v tahu klesl pro všechny výrobce, v případě Spektrum byl ale pokles výrazně mírnější.

Rozdíly mezi výrobcí lze sledovat také u sady vzorků umístěné do pece, kdy v případě meze pevnosti došlo u dvou výrobců (Spektrum, Prusament) k nárůstu, zatímco u Plasty Mladeč mez pevnosti klesla. Obdobně tomu bylo i v případě modulu pružnosti – pro PLA Spektrum došlo k zvýšení, u Prusament došlo k mírnému poklesu a u Plasty Mladeč byl pokles markantnější. Pro tažnost materiálu a tvrdost materiálu již nelze pozorovat výrazné rozdíly mezi výrobcí.

Po vystavení PLA povětrnostním vlivům se ovlivnění příliš neliší. Pouze v případě Plasty Mladeč došlo k poklesu meze pevnosti, zatímco u ostatních výrobců zůstala nezměněna. V případě modulu pružnosti v tahu i tažnosti došlo k poklesu obdobnému pro všechny výrobce. U tvrdosti lze pozorovat pokles u materiálu PLA Spektrum, přičemž u zbylých výrobců ke značnému ovlivnění nedošlo.

6.2.2 Porovnání výsledků mezi výrobcí – materiál PETG

Přehled výsledků materiálu PETG pro jednotlivé výrobce uvádí tab. 6.2. Porovnáním referenčních hodnot nelze spatřovat značné rozdíly mezi materiály v hodnotách meze pevnosti v tahu, modulu pružnosti v tahu a tvrdosti. Jedinou sledovanou vlastností, ve které panuje rozdílnost mezi výrobcí, je tažnost materiálu, která je nejvyšší v případě PETG Plasty Mladeč, následuje Spektrum a nejnižší hodnota byla naměřena pro PETG Prusament.

Při hodnocení výsledků ovlivnění vlastností materiálu PETG UV zářením lze říci, že mezi výrobcí se změna hodnot příliš nelišila. Trend nárůstu v případě meze pevnosti a modulu pružnosti je patrný u všech výrobců, zrovna tak výrazný pokles tažnosti nastal u všech značek. Mírný rozdíl lze pozorovat pouze u tvrdosti materiálu, kdy u Plasty Mladeč došlo k nevelkému nárůstu, zatímco hodnota u ostatních výrobců se mírně snížila, či zůstala stejná.

Ve tvrdosti materiálu lze nalézt jediný rozdíl rovněž v případě umístění vzorků do kondenzační komory, kdy tvrdost PETG Prusament klesla, zatímco u zbylých výrobců ovlivněna nebyla.

Po teplotních FT cyklech rovněž nelze pozorovat výrazné rozdíly mezi jednotlivými výrobcí. Jediná mírná rozlišnost je patrná v případě modulu pružnosti v tahu, kde u PETG Plasty Mladeč hodnota ovlivněna nebyla, zatímco u zbylých dvou došlo k poklesu.

Při pozorování ovlivnění vlastností umístěním vzorků do zvýšených teplot, lze spatřovat rozdílné výsledky mezi výrobcí pouze u tvrdosti materiálu – u PETG Spektrum došlo k nárůstu, zatímco u ostatních ovlivněna nebyla.

Značné rozdíly nenastaly ani po vystavení vzorků povětrnostním vlivům, žádné dosažené výsledky se nevymykají v rámci porovnání s ostatními výrobcí.

Tab. 6.2 Porovnání výsledků mezi jednotlivými výrobci – materiál PETG.

PETG	Výrobce	Referenční sada	UV 20 h	UV 100 h	Kondenzační komora	Teplotní cykly	Výdrž na teplotě 60 °C	Povětrnostní vlivy
Mez pevnosti v tahu [MPa]	Prusament	49,94	50,62	54,22	52,15	51,40	56,84	50,77
	Plasty Mladeč	49,88	51,86	54,26	52,49	51,65	56,37	52,46
	Spektrum	49,52	51,27	54,33	53,43	50,43	57,46	50,70
Modul pružnosti v tahu [MPa]	Prusament	500,42	510,35	521,30	536,48	478,88	545,16	502,45
	Plasty Mladeč	492,73	522,28	504,82	550,26	493,78	561,34	511,66
	Spektrum	486,72	516,85	514,89	541,46	478,51	559,80	505,55
Tažnost [%]	Prusament	59,90	41,00	19,07	26,06	29,72	22,30	43,86
	Plasty Mladeč	136,80	76,80	25,26	26,11	86,02	21,74	67,80
	Spektrum	99,00	35,58	16,79	26,32	74,30	15,26	44,18
Tvrdost [HShD]	Prusament	73,82	74,62	73,27	70,12	73,44	72,66	74,48
	Plasty Mladeč	72,82	75,87	75,15	73,12	73,96	73,18	75,29
	Spektrum	73,64	73,99	72,98	73,83	73,71	75,98	74,58

6.2.3 Porovnání výsledků mezi výrobci – materiál ABS

Porovnání hodnot ABS jednotlivých výrobců shrnuje tab. 6.3, ze které je patrný rozdíl již v rámci referenčních hodnot stanovovaných na vzorcích v základním stavu. ABS Gembird dosahovalo značně vyšší meze pevnosti oproti ostatním výrobcům. Rovněž modul pružnosti v tahu je nejvyšší u tohoto výrobce, druhý nejvyšší modul pružnosti byl zaznamenán u ABS Fillamentum. Významné rozdíly lze pozorovat rovněž v tažnosti materiálu, kterou vykazuje nejvyšší materiál ABS Plasty Mladeč, následovaný ABS Gembird. Tažnost ABS Fillamentum je méně jak poloviční oproti dříve zmíněným značkám. Různé hodnoty byly naměřeny také v případě tvrdosti materiálu dle Shore D, nejvyšší hodnota byla změřena u ABS Gembird.

Při pozorování vlivu UV záření je patrný obdobný trend u meze pevnosti v tahu, a to shodnost hodnot po 20 h expozice s referenčními a mírný pokles po 100 h. Stejně ovlivněny byly také všechny ostatní sledované vlastnosti – narostl modul pružnosti, značně se snížila tažnost a u tvrdosti materiálu došlo k mírnému navýšení.

Po umístění vzorků do kondenzační komory lze pozorovat rozdíly v případě tažnosti a tvrdosti materiálu. Zatímco tažnost ABS Fillamentum mírně narostla, u zbylých dvou výrobců došlo

naopak k poklesu. Klesla tvrdost ABS Plasty Mladeč, u ABS Gembird změna nenastala a u Fillamentum došlo k nárůstu.

Ovlivnění vlastností vystavením teplotních cyklů bylo v případě materiálu ABS u všech výrobců obdobné – mírný pokles meze pevnosti, modulu pružnosti v tahu a tvrdosti; téměř žádná změna tažnosti.

Obdobně je tomu u výsledků sady umístěné do pece. Mírný pokles meze pevnosti a tažnosti, naopak nárůst modulu pružnosti. Mírný pokles tvrdosti nastal u ABS Plasty Mladeč, u ostatních výrobců ke změně nedošlo.

Tab. 6.3 Porovnání výsledků mezi jednotlivými výrobci – materiál ABS.

ABS	Výrobce	Referenční sada	UV 20 h	UV 100 h	Kondenzační komora	Teplotní cykly	Výdrž na teplotě 60 °C	Povětrnostní vlivy
Mez pevnosti v tahu [MPa]	Fillamentum	38,54	38,07	37,63	37,18	36,29	37,80	36,02
	Plasty Mladeč	37,17	37,13	36,59	37,32	36,04	36,56	36,94
	Gembird	45,20	45,58	44,83	44,95	44,09	45,12	42,10
Modul pružnosti v tahu [MPa]	Fillamentum	519,60	571,55	587,70	603,60	463,90	626,40	515,10
	Plasty Mladeč	481,65	511,63	527,10	535,20	438,22	583,10	486,34
	Gembird	546,10	583,42	651,80	635,40	484,90	667,10	579,60
Tažnost [%]	Fillamentum	12,81	9,41	8,24	13,53	14,25	11,09	7,49
	Plasty Mladeč	36,40	17,60	14,66	25,96	35,16	30,99	12,81
	Gembird	27,86	20,65	14,35	14,45	31,95	25,17	7,40
Tvrdost [HShD]	Fillamentum	74,01	76,64	76,07	75,26	73,80	74,20	77,69
	Plasty Mladeč	75,07	75,84	77,68	73,98	74,40	73,58	77,07
	Gembird	76,47	79,37	80,35	76,74	75,73	77,10	79,25

Různé ovlivnění po vystavení povětrnostním vlivům u ABS je patrné u modulu pružnosti v tahu, kdy u výrobců Fillamentum a Plasty Mladeč k ovlivnění nedošlo, zatímco modul pružnosti ABS Gembird vzrostl. U ostatních vlastností po umístění vzorků do venkovního prostředí panuje v rámci spektra výrobců jednotný trend – mírný pokles meze pevnosti, významné snížení tažnosti a nárůst tvrdosti.

6.2.4 Porovnání výsledků mezi výrobci – materiál ASA

Tab. 6.4 porovnává dosažené výsledky materiálu ASA pro jednotlivé výrobce. Na referenčních hodnotách nelze v případě meze pevnosti v tahu, modulu pružnosti ani tvrdosti pozorovat výrazné rozdíly. Mírné rozdíly byly naměřeny v tažnosti materiálu, kterou vykazoval nejvyšší ASA C-TECH, druhou nejvyšší ASA Plasty Mladeč a nejnižší ASA Devil Design.

Po expozici UV záření je patrná různorodost výsledků opět pouze v případě tažnosti materiálu – tažnost ASA Plasty Mladeč a C-TECH mírně klesla, zatímco u ASA Devil Design došlo k nárůstu.

Umístěním vzorků do kondenzační komory došlo k mírnému poklesu meze pevnosti ASA Plasty Mladeč a ASA C-TECH, což je odlišné od Devil Design, pro který se hodnota nezměnila. Naopak v případě modulu pružnosti v tahu je trend jednotný – nárůst je patrný u všech výrobců. Dále došlo k poklesu tažnosti materiálu ASA C-TECH, zatímco u ostatních se hodnota nezměnila. Ovlivnění tvrdosti materiálu se mezi výrobci neliší.

V případě teplotního cyklování nebyly pozorovány značné rozdíly mezi jednotlivými výrobci materiálu ASA.

Tab. 6.4 Porovnání výsledků mezi jednotlivými výrobci – materiál ASA.

ASA	Výrobce	Referenční sada	UV 20 h	UV 100 h	Kondenzační komora	Teplotní cykly	Výdrž na teplotě 60 °C	Povětrnostní vlivy
Mez pevnosti v tahu [MPa]	Plasty Mladeč	46,19	46,53	46,24	44,17	46,41	44,34	46,96
	C-TECH	44,89	45,34	44,16	44,37	45,68	44,67	46,32
	Devil Design	45,28	44,99	43,98	45,36	45,87	45,82	46,27
Modul pružnosti v tahu [MPa]	Plasty Mladeč	542,32	562,29	605,90	557,90	510,40	616,93	561,68
	C-TECH	540,66	555,40	595,59	625,66	488,30	634,30	559,11
	Devil Design	559,41	537,61	565,50	592,90	506,55	653,52	518,10
Tažnost [%]	Plasty Mladeč	14,98	13,07	13,79	13,97	18,90	18,23	15,04
	C-TECH	18,84	11,98	18,41	10,97	19,02	10,75	16,91
	Devil Design	11,53	17,30	19,05	12,12	14,11	12,33	13,85
Tvrdost [HShD]	Plasty Mladeč	75,40	77,23	77,11	76,12	75,21	73,66	76,93
	C-TECH	74,45	77,26	76,68	75,30	73,82	73,56	75,65
	Devil Design	75,76	76,41	76,63	75,78	75,78	74,84	76,44

Vliv umístění vzorků do zvýšené teploty je u všech výrobců obdobný – k výraznému ovlivnění meze pevnosti nedošlo, modul pružnosti se významně navýšil a tvrdost mírně klesla. Jedinou rozdílnost lze spatřovat pouze u tažnosti materiálu. V případě C-TECH došlo k poklesu tažnosti, zatímco u výrobců Plasty Mladeč a Devil Design naopak k nárůstu.

Obdobně tomu bylo rovněž po vystavení vzorků povětrnostním vlivům, u kterých lze opět pozorovat rozlišnost v ovlivnění tažnosti materiálu.

6.2.5 Hodnocení výsledků výrobců jednotlivých materiálů

Pro porovnání materiálů mezi jednotlivými výrobci byl vytvořen bodovací systém, ve kterém bylo každému z materiálů přiděleno bodové skóre stanovené dle výsledků jednotlivých zkoušek. Pro každou vlastnost a sadu vzorků bylo materiálu za nejvyšší hodnotu uděleny 2 body a za druhou nejvyšší hodnotu 1 bod. Dalším aspektem hodnocení je cena za 1 kg materiálu dle aktuálního ceníku. Hodnocení výsledků testovaných výrobců jednotlivých materiálů shrnuje tab. 6.5, ze které je patrné, že vysoká cena ne vždy znamená rozdíl v kvalitě materiálů. Nejvýhodnějším materiálem v porovnání s ostatními výrobci se v poměru cena/výkon jeví materiál ABS Gembird.

Tab. 6.5 Hodnocení výsledků výrobců jednotlivých materiálů

Materiál	Výrobce	Skóre	Cena	Materiál	Výrobce	Skóre	Cena
PLA	Prusament	27	599 Kč	ABS	Fillamentum	18	713 Kč
	Plasty Mladeč	37	579 Kč		Gembird	48	380 Kč
	Spectrum	20	498 Kč		Plasty Mladeč	18	738 Kč
PETG	Prusament	19	699 Kč	ASA	C-TECH	21	724 Kč
	Plasty Mladeč	43	599 Kč		Devil Design	26	625 Kč
	Spectrum	22	539 Kč		Plasty Mladeč	37	799 Kč

6.3 Doporučení pro uživatele

Pro vzájemné porovnání materiálů byly zprůměrovány výsledky jednotlivých výrobců. Sledována nebyla pouze hodnota testovaných vlastností, ale také jejich procentuální změna vlivem jednotlivých faktorů. Zprůměrované výsledky a změny vlastností způsobené degraďačními vlivy shrnují tab. 6.6 a tab. 6.7.

Při výběru materiálu je důležité stanovit si požadavky na jeho vlastnosti a zároveň prostředí, kterému bude během použití materiál vystavován. Zřejmě nejčastěji je materiál hodnocen na základě meze pevnosti. Důležité jsou také výrobní aspekty a velikost dílu, jak bylo rozebráno v teoretické části práce.

Z hlediska hodnot meze pevnosti se jeví jako nejlepší materiál PLA, ovšem je nutné brát v potaz negativní ovlivnění kondenzační komorou, teplotními cykly a povětrnostními vlivy. Lze očekávat, že zvyšující se dobou působení těchto vlivů bude tento pokles výraznější. Po umístění vzorků PLA do pece o teplotě 60 °C sice nedošlo ke zhoršení vlastností, ovšem jednalo se o hraniční teplotu, protože použití za vyšších teplot limituje teplota měknutí a s tím související tvarová stabilita. PLA rovněž dosahovalo nejvyšších hodnot modulu pružnosti v tahu a tvrdosti, naopak vykazovalo nejnižší tažnost.

Tab. 6.6 Zprůměrované výsledky testovaných materiálů a procentuální změna vlastností způsobená jednotlivými vlivy – část 1.

		Referenční sada	UV 20 h		UV 100 h		Kondenzační komora	
Mez pevnosti v tahu	Materiál	MPa	MPa	Změna v %	MPa	Změna v %	MPa	Změna v %
	PLA	54,30	52,32	-3,63	58,20	7,18	44,39	-18,25
	PETG	49,78	51,25	2,95	54,27	9,02	52,69	5,85
	ABS	40,30	40,26	-0,11	39,68	-1,54	39,82	-1,21
	ASA	45,45	45,62	0,37	44,79	-1,45	44,63	-1,80
Modul pružnosti v tahu	Materiál	MPa	MPa	Změna v %	MPa	Změna v %	MPa	Změna v %
	PLA	698,19	673,01	-3,61	749,05	7,29	631,83	-9,50
	PETG	493,29	516,49	4,70	513,67	4,13	542,73	10,02
	ABS	515,78	555,53	7,71	588,87	14,17	591,40	14,66
	ASA	547,46	551,77	0,79	589,00	7,59	592,15	8,16
Tažnost	Materiál	%	%	Změna v %	%	Změna v %	%	Změna v %
	PLA	10,54	8,82	-16,29	8,71	-17,36	11,68	10,78
	PETG	98,57	51,13	-48,13	20,37	-79,33	26,16	-73,46
	ABS	25,69	15,89	-38,16	12,42	-51,67	17,98	-30,01
	ASA	15,12	14,12	-6,62	17,08	13,01	12,35	-18,28
Tvrдость	Materiál	HShD	HShD	Změna v %	HShD	Změna v %	HShD	Změna v %
	PLA	79,79	78,25	-1,93	80,85	1,33	75,52	-5,35
	PETG	73,43	74,83	1,91	73,80	0,51	72,36	-1,46
	ABS	75,18	77,28	2,79	78,03	3,79	75,33	0,19
	ASA	75,20	76,97	2,34	76,81	2,13	75,73	0,70

Z výše popsaných důvodů lze materiál PETG z hlediska meze pevnosti v tahu hodnotit jako vhodnější. Naměřené hodnoty jsou sice mírně nižší než v případě PLA, ale ani u jednoho z faktorů nedošlo k poklesu meze pevnosti – naopak, u všech faktorů byl pozorován mírný nárůst. Z toho důvodu lze materiál PETG z hlediska pevnosti považovat za vhodný k použití v těchto prostředích. Nevýhodami materiálu PETG jsou nižší modul pružnosti v tahu, u kterého je však rovněž patrný nárůst hodnot, a v porovnání s ostatními materiály nižší tvrdost. Ačkoliv došlo k významnému propadu tažnosti vlivem všech faktorů, stále PETG dosahovalo nejvyšší tažnosti ze všech testovaných materiálů.

Materiál ABS dosahoval nejnižších hodnot meze pevnosti v tahu, u které byl zároveň pozorován pokles vlivem všech faktorů, proto materiál v porovnání s ostatními testovanými nelze na základě výsledků doporučit.

V případě materiálu ASA došlo k nejmenšímu ovlivnění vlastností jednotlivými faktory. ASA sice dosahovalo nižších hodnot meze pevnosti oproti PLA a PETG, jeho výhodou je ale právě stabilita všech sledovaných vlastností. Oproti PETG dosahovalo vyššího modulu pružnosti v tahu a vyšší tvrdosti a zároveň materiál ASA dle rozboru v teoretické části odolává vyšším teplotám v porovnání s PETG. Z těchto důvodů lze rovněž doporučit jeho použití ve všech testovaných prostředích.

Tab. 6.7 Zprůměrované výsledky testovaných materiálů a procentuální změna vlastností způsobená jednotlivými vlivy – část 2.

		Referenční sada	Teplotní cykly		Výdrž na teplotě 60 °C		Povětrnostní vlivy	
Mez pevnosti v tahu	Materiál	MPa	MPa	Změna v %	MPa	Změna v %	MPa	Změna v %
	PLA	54,30	53,58	-1,32	55,48	2,18	53,36	-1,73
	PETG	49,78	51,16	2,77	56,89	14,28	51,31	3,07
	ABS	40,30	38,81	-3,71	39,83	-1,18	38,35	-4,84
	ASA	45,45	45,99	1,17	44,94	-1,12	46,52	2,34
Modul pružnosti v tahu	Materiál	MPa	MPa	Změna v %	MPa	Změna v %	MPa	Změna v %
	PLA	698,19	615,11	-11,90	697,00	-0,17	666,70	-4,51
	PETG	493,29	483,72	-1,94	555,43	12,60	506,55	2,69
	ABS	515,78	462,34	-10,36	625,53	21,28	527,01	2,18
	ASA	547,46	501,75	-8,35	634,92	15,97	546,30	-0,21
Tažnost	Materiál	%	%	Změna v %	%	Změna v %	%	Změna v %
	PLA	10,54	11,40	8,16	9,72	-7,81	8,95	-15,12
	PETG	98,57	63,35	-35,73	19,77	-79,95	51,95	-47,30
	ABS	25,69	27,12	5,57	22,42	-12,74	9,23	-64,06
	ASA	15,12	17,34	14,73	13,77	-8,91	15,27	0,99
Tvrdost	Materiál	HShD	HShD	Změna v %	HShD	Změna v %	HShD	Změna v %
	PLA	79,79	79,30	-0,61	77,27	-3,15	79,25	-0,67
	PETG	73,43	73,70	0,38	73,94	0,70	74,78	1,85
	ABS	75,18	74,64	-0,72	74,96	-0,30	78,00	3,75
	ASA	75,20	74,94	-0,35	74,02	-1,57	76,34	1,51

7 ZÁVĚR

Diplomová práce řeší problematiku stanovení mechanických vlastností vybraných materiálů (PLA, PETG, ABS, ASA) používaných pro 3D tisk, zároveň zkoumá vliv vybraných degradačních faktorů na mechanické vlastnosti materiálu. Teoretická část práce charakterizuje polymerní materiály a způsoby jejich degradace, dále rozebírá mechanické zkoušky materiálů a vybrané aditivní technologie. Experimentální část popisuje proces experimentu od volby tvaru vzorků a jejich zhotovení až po samotné provedení mechanických zkoušek. Zvolenými zkouškami byly zkouška tahem a zkouška tvrdosti Shore D. Vyhodnocovanými parametry byly mez pevnosti v tahu, modul pružnosti v tahu, tažnost materiálu a tvrdost Shore D. V další části práce bylo provedeno statistické zpracování naměřených výsledků a grafické porovnání. Následně byl zhodnocen dopad jednotlivých degradačních faktorů, bylo provedeno porovnání mezi výrobcí testovaných materiálů a na základě výsledků stanoveno doporučení pro uživatele 3D tisku.

V diplomové práci bylo dosaženo následujících cílů:

- byla zpracována charakteristika polymerních materiálů, byl proveden rozbor mechanických zkoušek a byla vypracována charakteristika aplikovaných aditivních technologií pro 3D tisk,
- vzorky byly vystaveny degradačním faktorům,
- u materiálů byly stanoveny mechanické parametry,
- bylo provedeno statistické zpracování naměřených výsledků,
- byl zhodnocen vliv provedených degradačních zkoušek,
- dosažené výsledky byly porovnány mezi výrobcí jednotlivých materiálů,
- na základě dosažených výsledků bylo stanoveno doporučení pro uživatele 3D tisku.

Všechny cíle diplomové práce byly splněny.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Překvapivé možnosti 3D tisku ve výrobě. *MMspektrum.com* [online]. © 2021 [cit. 2021-02-22]. Dostupné z:
<https://www.mmspektrum.com/clanek/prekvapive-moznosti-3d-tisku-ve-vyrobe.html>
2. Infographic: The History of 3D Printing. *Asme.org – The American Society of Mechanical Engineers*. © 2021 [cit. 2021-03-02]. Dostupné z:
<https://www.asme.org/topics-resources/content/infographic-the-history-of-3d-printing>
3. SCHIPPERS, Christina, Thomas BAHNERS, Jochen S. GUTMANN, Larisa A. TSARKOVA. Elaborating Mechanisms behind the Durability of Tough Polylactide Monofilaments under Elevated Temperature and Humidity Conditions. *VACS Applied Polymer Materials* [online]. 2021, 3 (3), s. 1406-1414. [cit. 2021-04-09].
ISSN 2637-6105. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/acsapm.0c01274>
4. ALDEEN, Nabaa Alaa, Bashar OWAID. Effect of ultraviolet and temperature on mechanical properties of three dimension printed materials. *AIP Conference Proceedings* [online]. 2020, 2213 (020067). [cit. 2021-04-10].
ISBN: 978-0-7354-1964-3. Dostupné z: <https://doi.org/10.1063/5.0000309>
5. SOLARSKI, Samuel, Manuela FERREIRA, Eric DEVAUX. Ageing of polylactide and polylactide nanocomposite filaments. *Polymer Degradation and Stability* [online]. 2008, 93 (3), s. 707-713. [cit. 2021-04-10]. ISSN 0141-3910. Dostupné z:
<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2007.12.006>
6. GUO, Jun, Rui XIAO, Chuanshuai TIAN, Minqiang JIANG. Optimizing physical aging in poly(ethylene terephthalate)-glycol (PETG). *Journal of Non-Crystalline Solids* [online]. 2018, 502 (3), s. 15-21. [cit. 2021-04-10]. ISSN 0022-3093.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2018.10.021>
7. ANDERSEN Emil, René MIKKELSEN, Søren KRISTIANSEN, Mogens HINGE. Real-time ageing of polyesters with varying diols. *Materials Chemistry and Physics* [online]. 2021, 261 (124240). [cit. 2021-04-11]. ISSN 0254-0584. Dostupné z:
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124240>
8. KHOSRAVANI Mohammad Reza, Ali ZOLFAGHARIAN, Matt JENNINGS, Tamara REINICKE. Structural performance of 3D-printed composites under various loads and environmental conditions. *Polymer Testing* [online]. 2020, 91 (106770).
[cit. 2021-04-11]. ISSN 0142-9418. Dostupné z:
<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106770>
9. KAKANURU Padmalatha, Kishore POCHIRAJU. Moisture Ingress and Degradation of Additively Manufactured PLA, ABS and PLA/SiC Composite Parts. *Additive Manufacturing* [online]. 2020, 36 (101529). [cit. 2021-04-12]. ISSN 2214-8604.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101529>
10. PÉREZ, J., J. VILAS, J. M. LAZA, S. ARNAIZ, F. MIJANGOS, E. BILBAO, L. M. LEÓN. Effect of Reprocessing and Accelerated Weathering on ABS Properties. *J. Polym. Environ.* [online]. 2010, 18 (1), s. 71-78. [cit. 2021-04-12]. ISSN 1572-8919.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10924-009-0154-7>
11. AFSHAR, Arash, Roy WOOD. Development of Weather-Resistant 3D Printed Structures by Multi-Material Additive Manufacturing. *Journal of Composites Science* [online]. 2020, 4 (94). [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/jcs4030094>

12. ELMUSHYAKHI Abraham. Freeze-thaw stabilization of fused deposition modeling 3D-printed SABIC structures. *Journal of King Saud University - Engineering Science* [online]. 2020. [cit. 2021-04-13]. ISSN 1018-3639. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.09.002>
13. DI LUDOVICO Marco, Filomena PISCITELLI, Andrea PROTA, Marino LAVORGNA, Giuseppe MENSITIERI, Gaetano MANFREDI. Improved mechanical properties of CFRP laminates at elevated temperatures and freeze–thaw cycling. *Construction and Building Materials* [online]. 2012, 31, s. 273-283. [cit. 2021-04-13]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.105>
14. ADHIKARY, Kamal Babu, Shusheng PANG, Mark P. STAIGER. Effects of the Accelerated Freeze-Thaw Cycling on Physical and Mechanical Properties of Wood Flour-Recycled Thermoplastic Composites. *Polymer Composites* [online]. 2009, 31 (2), s. 185-194. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/pc.20782>
15. DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery – výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006. ISBN 80-7080-617-6.
16. MACHEK, Václav, Jaromír SODOMKA. *Nauka o materiálu – 4. část: Polymery a kompozity s polymerní maticí*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-03927-4.
17. ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: teorie a praxe*. Praha: Grada Publishing, a. s., 2018. ISBN 978-80-271-0614-1.
18. Syntetické makromolekulární látky. *E-chembook.eu – Multimediální učebnice chemie pro gymnázia*. © 2021 [cit. 2021-01-18]. Dostupné z: <http://e-chembook.eu/synteticke-makromolekularni-latky>
19. BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. Svitavy: Střední odborné učiliště Svitavy, 2016 [cit. 2020-12-16]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
20. PTÁČEK, Luděk a kolektiv. *Nauka o materiálu II*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s. r. o., 2002. ISBN 80-7204-248-3.
21. Degree of Polymerization of Polymers. *Materials-today.com* [online]. © 2021 [cit. 2021-01-20]. Dostupné z: <https://materials-today.com/degree-of-polymerization-of-polymers-materials-today/>
22. MCKEEN, Laurence W. *The Effect of UV Light and Weather on Plastics and Elastomers*. 4. vyd. William Andrew Publishing, 2019. ISBN 978-0-12-816457-0.
23. MCKEEN, Laurence W. *The Effect of Temperature and Other Factors on Plastics and Elastomers*. 2. vyd. Norwich: William Andrew Publishing, 2008. ISBN 978-0-8155-1568-5.
24. 3D Printing Materials Guide. *All3DP.com* [online]. © 2021 [cit. 2021-02-22]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/3d-printing-materials-guide-3d-printer-material/>
25. Express guide of FDM 3D printing materials. *Treatstock.com* [online]. © 2021 [cit. 2021-02-22]. Dostupné z: <https://www.treatstock.com/guide/article/118-express-guide-of-fdm-3d-printing-materials>
26. Původce materiály. *Prusa3D.cz – Prusa Research a. s.* [online]. © 2021 [cit. 2021-02-22]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/materialy/>
27. Prusa Research by Josef Průša. *Příručka 3D tiskaře*. Vyd.: 3.13. Prusa Research a. s., 2020-03-18.

28. PLA Plastic/Material: All You Need to Know. *All3DP.com* [online]. © 2021 [cit. 2021-02-24]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/pla-plastic-material-polylactic-acid/>
29. Everything You Need To Know About Polyactic Acid (PLA). *CreativeMechanisms.com* [online]. © 2021 [cit. 2021-02-24]. Dostupné z: <https://www.creativemechanisms.com/blog/learn-about-polylactic-acid-pla-prototypes>
30. Materiálový slovník. *Materialpro3D.cz* [online]. © 2021 [cit. 2021-02-24]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/>
31. Přehled dostupných materiálů. *na3d.cz* [online]. [cit. 2021-02-24]. Dostupné z: <https://www.na3d.cz/blog/prehled-dostupnych-materialu>
32. Advanced Guide to Printing ASA Filament. *3DPrintingSolutions.com* [online]. © 2021 [cit. 2021-02-24]. Dostupné z: <https://www.3dprintingsolutions.com.au/User-Guides/how-to-3d-print-asa-filament>
33. Filament Properties Table. *Simplify3D.com* [online]. © 2021 [cit. 2021-03-19]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/properties-table/>
34. Materiály. *help.prusa3d.com – Prusa Research: Prusa Knowledge Base* [online]. © 2021 [cit. 2021-03-19]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/materials#_ga=2.10865524.1744310426.1616522816-896702491.1583656356
35. Materials Available. *Cosineadditive.com* [online]. [cit. 2021-03-19]. Dostupné z: <https://www.cosineadditive.com/en/materials>
36. PTÁČEK, Luděk a kolektiv. *Nauka o materiálu I*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s. r. o., 2003. ISBN 80-7204-283-1.
37. SKÁLOVÁ, Jana. *Základní zkoušky kovových materiálů*. Plzeň: Ediční středisko Vysoké školy strojní a elektrotechnické, 1990. ISBN 80-7082-021-7.
38. MACEK, Karel, Petr ZUNA a kolektiv. *Strojírenské materiály*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02798-8.
39. ČIŽMÁROVÁ, Elena, Jakub HORNÍK, Zdeňka JENÍKOVÁ, Jana SOBOTOVÁ. *Nauka o materiálu I. a II.: Cvičení*. Praha: ČVUT, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.
40. Kurz fyziky pro DS – Pevnost a lom látek. *Physics.mff.cuni.cz – Katedra fyziky povrchů a plazmatu* [online]. [cit. 2021-12-16]. Dostupné z: https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/kontinuum/2_6
41. JULIŠ, Martin. *Strojírenské materiály a tepelné zpracování: Hodnocení tvrdosti materiálů [přednáška]*. Brno: VUT FSI, 2020.
42. Metoda dle Shore. *Hanyko-praha.cz – HANYKO Praha s.r.o.* [online]. [cit. 2021-12-16]. Dostupné z: <https://www.hanyko-praha.cz/produkty/tvrdomery/co-je-tvrdost-a-jak-se-meri/shore/>
43. ČSN ISO 48-4. Pryž, vulkanizovaný nebo termoplastický elastomer – Stanovení tvrdosti – Část 4: Tvrdost metodou vtlačování hrotu tvrdoměru (tvrdost Shore). ICS 83.060. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, červenec 2019.
44. MAŠÍN, Ivan. *Inovační inženýrství: plánování a návrh inovovaného výrobku*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2012. ISBN 978-80-7372-852-6.
45. GRIMM, Todd. *User's Guide to Rapid Prototyping*. Society of Manufacturing Engineers, 2004. ISBN 978-0-87263-697-2.

-
46. CHUA, C. K., K. F. LEONG, C. S. LIM. *Rapid Prototyping: Principles and Applications*. Singapur: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2003. ISBN 981-238-117-1.
 47. GEBHARDT, Andreas. *Understanding additive manufacturing: Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing*. Mnichov: Carl Hanser Verlag, 2011. ISBN 978-3-446-42552-1.
 48. SEDLÁK, Josef. Speciální technologie obrábění: Aditivní technologie – metody Rapid Prototyping [přednáška]. Brno: VUT FSI, 2020-12-02.
 49. MORITZ, Tassilo, Saeed MALEKSAEEDI, Additive manufacturing of ceramic components – Laminated Object Manufacturing. In: ZHANG, Jing, Yeon-Gil JUNG. *Additive Manufacturing*. Butterworth-Heinemann, 2018, str. 105-161, ISBN 978-0-12-812155-9.
 50. KONTA, Andrea, Marta GARCÍA, Dolores SERRANO. Personalised 3D Printed Medicines: Which Techniques and Polymers Are More Successful?. *Bioengineering*. 2017, 4 (4). ISSN 2306-5354.
 51. BCN3D Sigma R19. *Elvira Abc3D.cz* [online]. © 2021 [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: <https://www.abc3d.cz/produktova-stranka/bcn3d-sigma-r19>
 52. Original Prusa i3 MK2.5S & MK3S/+ Multi Material 2S upgrade kit (MMU2S). *Shop.prusa3d.com – Prusa Research: Official Josef Prusa Shop* [online]. © 2021 [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/cs/upgrady/183-original-prusa-i3-mk25s-mk3s-multi-material-2s-upgrade-kit-mmu2s.html>
 53. What is 3D Printing. *Filamentone.com* [online]. © 2021 [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: <https://www.filamentone.com/blogs/3d-printing-blog/what-is-3d-printing>
 54. FDM 3D Printers Explained: Cartesian, Delta, CoreXY, & More. *All3DP.com* [online]. © 2021 [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/cartesian-3d-printer-delta-scara-belt-corexy-polar/>
 55. SCHMITT, Betina, Christiano ZIRBES, Cassiano BONIN, Daniel LOHMANN, Diovani LENCINA, Aurélio NETTO. A Comparative Study of Cartesian and Delta 3D Printers on Producing PLA Parts. *Materials Research*. 2018, 20 (2). ISSN 1980-5373.
 56. ČSN EN ISO 527-2. Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 2: Zkušební podmínky pro tvárené plasty. ICS 83.080.01. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, říjen 2012.
 57. ČSN EN ISO 868. Plasty a ebonit – Stanovení tvrdosti vtlačováním hrotu tvrdoměru (tvrdost Shore). ICS 83.080.01; 83.060. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, říjen 2003.
 58. Amatérská meteorologická stanice Kostelec nad Orlicí. *Počasi-kno.cz* [online]. © 2011 [cit. 2021-04-29]. Dostupné z: <http://www.pocasi-kno.cz/data.php>
 59. Meteorologická stanice Polom (provozovatel ČHMÚ). *In-pocasi.cz* [online]. © 2021 [cit. 2021-04-29]. Dostupné z: <https://www.in-pocasi.cz/archiv/polom/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Jednotka	Popis
.gcode	[-]	Označení formátu dat
.stl	[-]	Označení formátu dat
.xls	[-]	Označení formátu dat
3D	[-]	Three-Dimensional
3DP	[-]	Three-Dimensional Printing
A	[%]	Tažnost materiálu
ABS	[-]	Acrylonitrile-Butadiene-Styrene
ASA	[-]	Acrylonitrile-Styrene-Acrylate
d	[mm]	Průměr délek vtisku
D	[mm]	Průměr indentoru
DLP	[-]	Digital Light Processing
DMLS	[-]	Direct Metal Laser Sintering
E	[MPa]	Modul pružnosti v tahu
F	[N]	Zatěžující síla
$F_{0,2}$	[N]	Zatížení, které vyvolá deformaci $\varepsilon = 0,002$
FDM	[-]	Fused Deposition Modeling
F_E	[N]	Mez úměrnosti
F_e	[N]	Síla odpovídající mezi kluzu
FFF	[-]	Fused Filament Fabrication
F_m	[N]	Maximální síla dosažená při zkoušce
FT	[-]	Freeze-Thaw
HBW	[N/mm ²]	Tvrdost dle Brinella
HDPE	[-]	High-density polyethylene
HIPS	[-]	High-Impact Polystyrene
HV	[N/mm ²]	Tvrdost dle Vickerse
L	[mm]	Okamžitá délka zkušební tyče
L_0	[mm]	Počáteční délka
LOM	[-]	Laminated Object Manufacturing
L_u	[mm]	Délka po přetržení
PA	[-]	Polyamide
PC	[-]	Polycarbonate
PET	[-]	Polyethylene-Terephthalate
PETG	[-]	Polyethylene-Terephthalate-Glycol
PJ	[-]	PolyJet
PLA	[-]	Polyactic Acid
PP	[-]	Polypropylen
PVA	[-]	Polyvinyl Alcohol

Symbol	Jednotka	Popis
R	[MPa]	Smluvní napětí
R _e	[MPa]	Mez kluzu
R _{eH}	[MPa]	Horní mez kluzu
R _{eL}	[MPa]	Dolní mez kluzu
R _m	[MPa]	Mez pevnosti
RP	[-]	Rapid Prototyping
R _{p0,2}	[MPa]	Smluvní mez kluzu
S ₀	[mm ²]	Počáteční plocha průřezu zkušebního tělesa
SGC	[-]	Solid Ground Cutting
SLA	[-]	Stereolithography
SLS	[-]	Selective Laser Sintering
S _u	[mm ²]	Plocha průřezu po přetržení
TPE	[-]	Thermoplastic Elastomer
TPU	[-]	Thermoplastic Polyurethane
UV	[-]	Ultraviolet
Z	[%]	Kontrakce materiálu
α	[°]	Směrnice přímky dle Hookeova zákona
ΔL	[mm]	Prodloužení měřené délky
ε	[-]	Relativní prodloužení
σ	[MPa]	Skutečné napětí
φ	[-]	Okamžité prodloužení

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Statistické zpracování hodnocených parametrů pro jednotlivé materiály

PŘÍLOHA 1

Základní statické parametry meze pevnosti v tahu – Plasty Mladeč PLA.

Plasty Mladeč PLA – Mez pevnosti v tahu [MPa]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	59,06	2,8	7,84	59,38	56,14	62,73
UV 20 h	54,872	0,926	0,858	54,973	53,238	55,916
Výdrž na teplotě 60 °C	54,228	1,998	3,991	54,327	50,562	56,378
Kondenzační komora	42,595	1,472	2,165	42,116	41,351	45,421
UV 100 h	58,813	1,254	1,573	59,324	56,794	60,294
Teplotní cykly	56,73	0,916	0,839	56,41	55,374	58,205
Povětrnostní vlivy	55,767	0,766	0,586	55,659	54,854	57,234

Základní statické parametry modulu pružnosti v tahu – Plasty Mladeč PLA.

Plasty Mladeč PLA – Modul pružnosti v tahu [MPa]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	742,7	46,9	2198,9	756,1	660,6	801,5
UV 20 h	701,85	24,11	581,42	703,53	657,61	733,48
Výdrž na teplotě 60 °C	677,1	54,7	2991,7	682,6	594,8	772,4
Kondenzační komora	611,8	96,7	9348,1	603,7	481,8	775,6
UV 100 h	759,1	50,5	2551,9	762,7	690,8	836,3
Teplotní cykly	657,5	32,9	1085	647,6	614,1	717,9
Povětrnostní vlivy	711,3	42,9	1836,9	724,4	659,2	780,8

Základní statické parametry tažnosti – Plasty Mladeč PLA.

Plasty Mladeč PLA – Tažnost [%]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	9,746	0,72	0,519	9,817	8,797	10,994
UV 20 h	8,5929	0,1783	0,0318	8,6037	8,4029	8,8211
Výdrž na teplotě 60 °C	9,661	0,842	0,709	9,544	8,5	10,824
Kondenzační komora	12,08	2,086	4,353	12,19	9,626	15,849
UV 100 h	8,558	0,743	0,553	8,412	7,586	9,517
Teplotní cykly	11,173	1,076	1,158	11,408	9,692	12,931
Povětrnostní vlivy	8,915	0,477	0,227	8,782	8,309	9,731

Základní statické parametry tvrdosti – Plasty Mladeč PLA.

Plasty Mladeč PLA – Tvrdost [HShD]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	80,61	0,816	0,665	80,7	78,8	81,8
UV 20 h	79,29	1,493	2,228	79,95	76,5	80,8
Výdrž na teplotě 60 °C	76,5	2,8	7,85	76,15	73,5	80,2
Kondenzační komora	78,2	2,63	6,91	78,2	75,6	80,8
UV 100 h	80,65	1,259	1,585	80,7	78,3	82
Teplotní cykly	80,58	0,883	0,78	80,35	79,4	81,7
Povětrnostní vlivy	81,17	1,175	1,38	81,1	79,4	83

Základní statické parametry meze pevnosti v tahu – Spektrum PLA.

Spektrum PLA – Mez pevnosti v tahu [MPa]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	51,301	0,426	0,182	51,283	50,69	51,911
UV 20 h	50,98	0,945	0,893	51,262	49,442	51,963
Výdrž na teplotě 60 °C	58,05	3,4	11,55	57,95	54,16	64,52
Kondenzační komora	50,1	3,34	11,14	48,27	46,58	54,32
UV 100 h	59,794	0,358	0,128	59,828	59,315	60,331
Teplotní cykly	53,142	0,817	0,667	53,016	51,899	54,235
Povětrnostní vlivy	51,626	1,292	1,671	51,422	49,855	53,802

Základní statické parametry modulu pružnosti v tahu – Spektrum PLA.

Spektrum PLA – Modul pružnosti v tahu [MPa]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	658,49	10,48	109,75	660,55	645,75	669,13
UV 20 h	652,77	21,56	464,9	645,75	624,01	684,23
Výdrž na teplotě 60 °C	725,2	56,2	3159	736	651,3	814,1
Kondenzační komora	699,1	57,3	3282	681,8	631,9	774
UV 100 h	752,88	24,12	581,78	754,72	710,79	785,08
Teplotní cykly	606,54	19,48	379,63	606,21	568,05	630,98
Povětrnostní vlivy	630,8	31,7	1002,1	636,8	579,4	678,5

Základní statické parametry tažnosti – Spektrum PLA.

Spektrum PLA – Tažnost [%]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	11,097	1,474	2,174	11,069	9,073	13,577
UV 20 h	9,454	0,626	0,392	9,317	8,752	10,338
Výdrž na teplotě 60 °C	9,677	0,696	0,484	9,796	8,569	10,521
Kondenzační komora	10,704	0,89	0,791	10,89	9,241	12,192
UV 100 h	8,999	0,371	0,138	9,139	8,522	9,4
Teplotní cykly	12,184	1,13	1,277	12,024	10,941	14,242
Povětrnostní vlivy	9,932	0,469	0,22	9,751	9,534	10,883

Základní statické parametry tvrdosti – Spektrum PLA.

Spektrum PLA – Tvrdost [HShD]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	78,16	1,431	2,047	78,25	76,5	80,8
UV 20 h	77,46	2,253	5,074	77,1	74,5	80,8
Výdrž na teplotě 60 °C	78,125	0,978	0,956	78,35	76,8	79
Kondenzační komora	73,4	1,393	1,94	73,65	71,5	74,8
UV 100 h	80,31	1,368	1,872	80,65	78,3	81,9
Teplotní cykly	78,11	1,219	1,485	78,05	76,3	80,1
Povětrnostní vlivy	76,286	0,474	0,225	76,2	75,5	77

Základní statické parametry meze pevnosti v tahu – Prusament PLA.

Prusament PLA – Mez pevnosti v tahu [MPa]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	52,532	1,021	1,042	52,809	51,159	53,608
UV 20 h	51,121	1,381	1,906	50,687	50,058	53,742
Výdrž na teplotě 60 °C	54,16	3,49	12,15	52,77	51,04	59,89
Kondenzační komora	40,457	0,864	0,747	40,503	39,128	41,439
UV 100 h	55,992	0,829	0,688	56,019	54,471	56,97
Teplotní cykly	50,87	4,85	23,56	53,13	41,43	55,13
Povětrnostní vlivy	52,677	2,287	5,23	53,224	48,824	55,482

Základní statické parametry modulu pružnosti v tahu – Prusament PLA.

Prusament PLA – Modul pružnosti v tahu [MPa]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	693,38	19,22	369,57	694,66	668,2	720,79
UV 20 h	664,4	58,6	3428,6	676,6	547,1	738,1
Výdrž na teplotě 60 °C	688,7	62,1	3855	675,8	597,2	763,8
Kondenzační komora	584,6	84,1	7066,7	557,1	478,5	735,7
UV 100 h	735,18	23,54	553,96	740,22	695,87	768,78
Teplotní cykly	581,3	60,9	3713,1	601,9	506,8	661,1
Povětrnostní vlivy	658	98,9	9788,1	704,4	539	761

Základní statické parametry tažnosti – Prusament PLA.

Prusament PLA – Tažnost [%]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	10,767	1,396	1,949	10,47	9,348	12,784
UV 20 h	8,426	0,303	0,092	8,335	8,111	9,045
Výdrž na teplotě 60 °C	9,808	0,886	0,784	9,662	9,014	11,344
Kondenzační komora	12,25	2,404	5,779	12,229	9,882	15,872
UV 100 h	8,5734	0,187	0,035	8,5524	8,3608	8,8556
Teplotní cykly	10,848	1,837	3,374	10,209	8,705	13,345
Povětrnostní vlivy	7,989	0,687	0,472	8,114	6,794	8,693

Základní statické parametry tvrdosti – Prusament PLA.

Prusament PLA – Tvrdost [HShD]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	80,59	0,882	0,779	79,2	80,55	81,9
UV 20 h	77,99	2,537	6,439	74,3	78,9	81,5
Výdrž na teplotě 60 °C	77,175	0,562	0,316	76,6	77,1	77,9
Kondenzační komora	74,96	2,71	7,33	71	75,2	77,8
UV 100 h	81,59	0,795	0,632	80,4	81,75	82,9
Teplotní cykly	79,2	1,492	2,227	76,6	79,35	81,6
Povětrnostní vlivy	80,3	1,264	1,598	77,9	80,7	81,9

Základní statické parametry meze pevnosti v tahu – Prusament PETG.

Prusament PETG – Mez pevnosti v tahu [MPa]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	49,942	0,929	0,862	50,171	48,553	50,973
UV 20 h	50,617	0,166	0,0277	50,545	50,499	50,923
Výdrž na teplotě 60 °C	56,838	0,635	0,403	56,898	55,779	57,571
Kondenzační komora	52,149	1,027	1,055	52,38	50,688	53,285
UV 100 h	54,217	0,355	0,126	54,069	53,792	54,868
Teplotní cykly	51,399	0,399	0,159	51,422	50,919	52,078
Povětrnostní vlivy	50,774	0,344	0,119	50,799	50,213	51,177

Základní statické parametry modulu pružnosti v tahu – Prusament PETG.

Prusament PETG – Modul pružnosti v tahu [MPa]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	500,42	2,45	5,99	501,01	496,89	503,22
UV 20 h	510,35	5,3	28,13	511,5	501,74	517,6
Výdrž na teplotě 60 °C	545,16	24,16	583,53	549,54	507,63	578,6
Kondenzační komora	536,48	20,91	437,29	529,22	506,67	559,99
UV 100 h	521,3	10,25	105,1	519,51	509,9	538,7
Teplotní cykly	478,88	8,91	79,45	475,58	468,85	495,88
Povětrnostní vlivy	502,45	5,82	33,87	504,21	492,65	507,34

Základní statické parametry tažnosti – Prusament PETG.

Prusament PETG – Tažnost [%]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	59,9	30,4	926,5	47,1	33,8	101,1
UV 20 h	41	10,95	119,79	39,42	29,56	61,48
Výdrž na teplotě 60 °C	22,3	5,76	33,17	23,78	11,87	28,44
Kondenzační komora	26,063	2,328	5,417	25,459	24,152	30,469
UV 100 h	19,07	5,47	29,94	18,6	12,96	29,32
Teplotní cykly	29,72	3,24	10,5	28,79	26,07	34,44
Povětrnostní vlivy	43,86	18,83	354,71	40,44	25,78	68,77

Základní statické parametry tvrdosti – Prusament PETG.

Prusament PETG – Tvrdost [HShD]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	73,82	0,794	0,631	73,95	72,4	74,7
UV 20 h	74,62	1,754	3,077	74,4	72,8	77,7
Výdrž na teplotě 60 °C	72,657	1,131	1,28	73,2	71	73,6
Kondenzační komora	70,12	5,07	25,66	70,75	62,5	75,2
UV 100 h	73,27	1,172	1,373	73,6	71,6	74,5
Teplotní cykly	73,44	1,276	1,629	73,75	71	74,9
Povětrnostní vlivy	74,48	1,059	1,122	74,45	73,1	76,4

Základní statické parametry meze pevnosti v tahu – Plasty Mladeč PETG.

Plasty Mladeč PETG – Mez pevnosti v tahu [MPa]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	49,881	1,91	3,65	50,813	46,411	51,533
UV 20 h	51,855	0,464	0,216	51,708	51,327	52,74
Výdrž na teplotě 60 °C	56,368	0,763	0,582	56,462	54,825	57,22
Kondenzační komora	52,491	0,305	0,093	52,624	51,892	52,749
UV 100 h	54,26	0,479	0,229	54,352	53,423	54,719
Teplotní cykly	51,651	0,842	0,709	52,034	50,183	52,454
Povětrnostní vlivy	52,462	0,584	0,341	52,551	51,393	53,054

Základní statické parametry modulu pružnosti v tahu – Plasty Mladeč PETG.

Plasty Mladeč PETG – Modul pružnosti v tahu [MPa]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	492,73	22,4	501,94	499,27	454,59	515,22
UV 20 h	522,28	7,94	63,03	522,57	507,67	533,82
Výdrž na teplotě 60 °C	561,34	16,62	276,18	562,87	529,59	577,66
Kondenzační komora	550,26	15,23	232,01	553,65	524,35	569,57
UV 100 h	504,82	17,73	314,36	509,5	471,51	522,09
Teplotní cykly	493,78	6,54	42,73	493,53	484,58	504,11
Povětrnostní vlivy	511,66	3,24	10,53	512,65	505,11	515,11

Základní statické parametry tažnosti – Plasty Mladeč PETG.

Plasty Mladeč PETG – Tažnost [%]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	136,8	38,3	1470,5	132,6	89,9	209,6
UV 20 h	76,8	35,7	1275,5	83,2	27,9	119
Výdrž na teplotě 60 °C	21,74	7,77	60,32	22,83	11,54	30,93
Kondenzační komora	26,11	4,41	19,49	25,46	19,42	32,37
UV 100 h	25,26	3,72	13,84	26,04	19,61	29,46
Teplotní cykly	86,02	11,22	125,9	82,41	76,65	106,7
Povětrnostní vlivy	67,8	34,4	1183,6	65,4	26,6	115,1

Základní statické parametry tvrdosti – Plasty Mladeč PETG.

Plasty Mladeč PETG – Tvrdost [HShD]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	72,82	1,003	1,006	72,7	71,2	74,4
UV 20 h	75,87	1,406	1,978	75,55	73,8	78
Výdrž na teplotě 60 °C	73,18	0,835	0,697	72,9	72,4	74,3
Kondenzační komora	73,12	1,453	2,112	73,3	70,7	74,3
UV 100 h	75,15	0,945	0,894	75,3	72,9	76,4
Teplotní cykly	73,96	0,978	0,956	74,25	72,4	74,9
Povětrnostní vlivy	75,29	0,936	0,877	75,15	74,2	77,2

Základní statické parametry meze pevnosti v tahu – Spektrum PETG.

Spektrum PETG – Mez pevnosti v tahu [MPa]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	49,518	2,441	5,957	48,246	46,565	52,282
UV 20 h	51,272	0,673	0,453	51,337	50,332	52,052
Výdrž na teplotě 60 °C	57,458	0,768	0,589	57,482	56,501	58,681
Kondenzační komora	53,425	0,507	0,257	53,299	52,844	54,442
UV 100 h	54,328	0,311	0,097	54,319	53,997	54,748
Teplotní cykly	50,43	0,91	0,827	50,663	48,736	51,479
Povětrnostní vlivy	50,697	0,664	0,44	50,803	49,367	51,354

Základní statické parametry modulu pružnosti v tahu – Spektrum PETG.

Spektrum PETG – Modul pružnosti v tahu [MPa]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	486,72	19,99	399,44	477,06	466,96	513,5
UV 20 h	516,85	3,66	13,39	517,92	509,79	520,67
Výdrž na teplotě 60 °C	559,8	15,05	226,37	561,19	541,96	576,14
Kondenzační komora	541,46	20,58	423,67	543,05	514,62	569,38
UV 100 h	514,89	4,82	23,19	515,08	509,15	523,77
Teplotní cykly	478,51	7,06	49,8	480,14	464,83	484,9
Povětrnostní vlivy	505,55	5,12	26,22	504,13	498,42	514,64

Základní statické parametry tažnosti – Spektrum PETG.

Spektrum PETG – Tažnost [%]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	99	62,6	3914,6	92,4	34,2	169,9
UV 20 h	35,58	9,96	99,11	29,47	28,44	51,58
Výdrž na teplotě 60 °C	15,26	3,6	12,93	14	11,61	19,91
Kondenzační komora	26,32	8,63	74,54	28,31	11,29	39,26
UV 100 h	16,79	4,95	24,52	14,13	12,45	24,41
Teplotní cykly	74,3	41,4	1711,7	71,6	30,9	125,6
Povětrnostní vlivy	44,18	17,71	313,63	34,37	31	77,85

Základní statické parametry tvrdosti – Spektrum PETG.

Spektrum PETG – Tvrdost [HShD]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	73,64	1,044	1,089	73,85	71,7	74,9
UV 20 h	73,99	1,081	1,168	74,25	72,4	75,4
Výdrž na teplotě 60 °C	75,98	1,069	1,142	75,8	75	77,6
Kondenzační komora	73,825	0,443	0,196	73,8	73,4	74,3
UV 100 h	72,98	1,145	1,311	72,75	71,4	75
Teplotní cykly	73,71	1,137	1,292	74	72	74,8
Povětrnostní vlivy	74,58	1,049	1,1	74,55	72,5	76,6

Základní statické parametry meze pevnosti v tahu – Fillamentum ABS.

Fillamentum ABS – Mez pevnosti v tahu [MPa]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	38,535	0,295	0,087	38,485	38,129	39,034
UV 20 h	38,07	0,18	0,0323	38,117	37,768	38,298
Výdrž na teplotě 60 °C	37,802	0,647	0,419	37,855	36,996	38,572
Kondenzační komora	37,183	0,305	0,093	37,212	36,682	37,63
UV 100 h	37,629	0,185	0,034	37,599	37,447	38,007
Teplotní cykly	36,286	0,377	0,142	36,344	35,564	36,728
Povětrnostní vlivy	36,019	0,607	0,369	36,165	34,975	36,897

Základní statické parametry modulu pružnosti v tahu – Fillamentum ABS.

Fillamentum ABS – Modul pružnosti v tahu [MPa]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	519,6	30,6	933,8	512,4	490,1	577,4
UV 20 h	571,55	12,98	168,45	571,7	556,04	594,61
Výdrž na teplotě 60 °C	626,4	31,6	1001,4	637	587,4	661,5
Kondenzační komora	603,6	26,7	712,1	597,5	570,4	642
UV 100 h	587,7	28,3	799,2	586,2	552,3	629,8
Teplotní cykly	463,9	53,3	2835,7	479,3	394,5	547,7
Povětrnostní vlivy	515,1	51,9	2696,7	529,1	417,2	562,9

Základní statické parametry tažnosti – Fillamentum ABS.

Fillamentum ABS – Tažnost [%]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	12,809	1,98	3,919	13,238	9,896	14,719
UV 20 h	9,412	0,732	0,535	9,241	8,665	10,48
Výdrž na teplotě 60 °C	11,086	1,276	1,627	11,276	9,691	13,312
Kondenzační komora	13,527	1,524	2,321	13,596	11,829	15,901
UV 100 h	8,241	0,693	0,481	8,272	7,394	9,347
Teplotní cykly	14,245	2,262	5,117	12,983	11,673	17,84
Povětrnostní vlivy	7,493	0,698	0,488	7,273	6,716	8,756

Základní statické parametry tvrdosti – Fillamentum ABS.

Fillamentum ABS – Tvrdost [HShD]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	74,01	0,852	0,725	73,95	72,9	75,6
UV 20 h	76,64	1,339	1,794	76,6	74,8	78,7
Výdrž na teplotě 60 °C	74,2	0,698	0,487	74,35	73,3	74,8
Kondenzační komora	75,26	0,451	0,203	75,3	74,6	75,8
UV 100 h	76,07	1,02	1,04	76,15	73,8	77,6
Teplotní cykly	73,8	0,97	0,94	73,95	71,9	74,9
Povětrnostní vlivy	77,69	0,863	0,745	77,55	76,6	79,2

Základní statické parametry meze pevnosti v tahu – Plasty Mladeč ABS.

Plasty Mladeč ABS – Mez pevnosti v tahu [MPa]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	37,171	0,43	0,185	37,251	36,459	37,655
UV 20 h	37,13	0,473	0,224	37,081	36,403	37,779
Výdrž na teplotě 60 °C	36,558	0,289	0,083	36,534	36,101	36,892
Kondenzační komora	37,321	0,489	0,239	37,334	36,661	37,903
UV 100 h	36,585	0,257	0,0658	36,596	36,264	36,973
Teplotní cykly	36,035	0,769	0,592	36,278	34,68	36,741
Povětrnostní vlivy	36,941	0,414	0,171	36,817	36,546	37,701

Základní statické parametry modulu pružnosti v tahu – Plasty Mladeč ABS.

Plasty Mladeč ABS – Modul pružnosti v tahu [MPa]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	481,65	18,84	354,98	478,54	453,99	516,59
UV 20 h	511,63	16,38	268,39	510,24	484,6	533,99
Výdrž na teplotě 60 °C	583,1	45,2	2040,5	602,3	519,2	629,3
Kondenzační komora	535,2	46	2117,7	540,5	457	593,7
UV 100 h	527,1	31,8	1013,9	524	475,1	572,1
Teplotní cykly	438,22	15,52	240,79	433,44	425,35	470,08
Povětrnostní vlivy	486,34	17,37	301,84	478,24	464,21	511,02

Základní statické parametry tažnosti – Plasty Mladeč ABS.

Plasty Mladeč ABS – Tažnost [%]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	36,4	10,37	107,63	33,29	22,47	51,43
UV 20 h	17,596	2,533	6,414	17,313	13,578	21,035
Výdrž na teplotě 60 °C	30,99	6,58	43,3	29,24	21,71	41,28
Kondenzační komora	25,96	3,97	15,74	25,39	19,89	32,26
UV 100 h	14,656	2,001	4,003	14,759	12,103	18,135
Teplotní cykly	35,16	4,74	22,5	32,8	30,38	42,02
Povětrnostní vlivy	12,807	1,045	1,092	12,638	11,564	14,011

Základní statické parametry tvrdosti – Plasty Mladeč ABS.

Plasty Mladeč ABS – Tvrdost [HShD]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	75,07	0,739	0,547	75,2	73,6	75,9
UV 20 h	75,837	0,558	0,311	75,7	75,1	77
Výdrž na teplotě 60 °C	73,575	0,263	0,069	73,6	73,3	73,8
Kondenzační komora	73,98	1,085	1,177	73,9	72,4	75,3
UV 100 h	77,68	1,247	1,555	77,5	75,8	79,4
Teplotní cykly	74,4	1,108	1,227	74,3	72,6	76,3
Povětrnostní vlivy	77,07	1,257	1,58	76,65	75,2	79,1

Základní statické parametry meze pevnosti v tahu – Gembird ABS.

Gembird ABS – Mez pevnosti v tahu [MPa]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	45,2	1,285	1,651	45,288	43,585	46,39
UV 20 h	45,575	0,306	0,093	45,7	45,029	45,954
Výdrž na teplotě 60 °C	45,118	0,818	0,669	45,292	43,695	46,01
Kondenzační komora	44,95	0,881	0,777	44,933	43,253	46,195
UV 100 h	44,826	0,213	0,0454	44,765	44,596	45,266
Teplotní cykly	44,088	0,899	0,808	44,587	42,846	45,156
Povětrnostní vlivy	42,099	1,413	1,996	41,972	39,913	44,372

Základní statické parametry modulu pružnosti v tahu – Gembird ABS.

Gembird ABS – Modul pružnosti v tahu [MPa]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	546,1	34,7	1202,1	535,4	512,6	612,1
UV 20 h	583,42	13,36	178,57	580,09	567,96	608,62
Výdrž na teplotě 60 °C	667,1	52,4	2748,9	690,2	562,7	716,5
Kondenzační komora	635,4	52,6	2769,8	648,1	572,4	717
UV 100 h	651,8	34,6	1198,9	654,8	586,3	698,2
Teplotní cykly	484,9	60	3602,8	512,5	399,7	533,9
Povětrnostní vlivy	579,6	37,8	1425,9	601,1	514	615,8

Základní statické parametry tažnosti – Gembird ABS.

Gembird ABS – Tažnost [%]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	27,86	7,65	58,58	25,59	17,85	39,13
UV 20 h	20,65	2,83	8,02	21,38	15,25	23,15
Výdrž na teplotě 60 °C	25,17	6,88	47,33	26,77	13,41	34,91
Kondenzační komora	14,45	3,48	12,1	14,68	9,63	20,76
UV 100 h	14,351	1,329	1,767	14,073	12,972	16,463
Teplotní cykly	31,95	7,31	53,43	32,08	22,17	44,08
Povětrnostní vlivy	7,397	0,379	0,143	7,391	6,966	7,992

Základní statické parametry tvrdosti – Gembird ABS.

Gembird ABS – Tvrdost [HShD]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	76,47	0,767	0,589	75,3	76,25	77,7
UV 20 h	79,37	0,469	0,22	78,9	79,25	80,4
Výdrž na teplotě 60 °C	77,1	1,233	1,52	75,3	77,5	78,1
Kondenzační komora	76,74	0,498	0,248	76	76,7	77,2
UV 100 h	80,35	1,318	1,737	78	80,6	81,5
Teplotní cykly	75,73	0,958	0,918	74,2	75,6	77,7
Povětrnostní vlivy	79,25	1,159	1,343	77,6	79,15	80,9

Základní statické parametry meze pevnosti v tahu – Plasty Mladeč ASA.

Plasty Mladeč ASA – Mez pevnosti v tahu [MPa]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	46,188	0,253	0,0642	46,152	45,72	46,507
UV 20 h	46,526	0,285	0,081	46,671	46,161	46,849
Výdrž na teplotě 60 °C	44,336	0,679	0,462	44,59	43,264	45,067
Kondenzační komora	44,165	0,22	0,0486	44,054	43,976	44,52
UV 100 h	46,239	0,296	0,087	46,293	45,72	46,606
Teplotní cykly	46,413	0,397	0,158	46,538	45,95	46,996
Povětrnostní vlivy	46,96	0,202	0,041	46,943	46,684	47,259

Základní statické parametry modulu pružnosti v tahu – Plasty Mladeč ASA.

Plasty Mladeč ASA – Modul pružnosti v tahu [MPa]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	542,32	25,64	657,15	535,33	516,63	590,18
UV 20 h	562,29	21,84	476,83	570,73	535,6	596,49
Výdrž na teplotě 60 °C	616,93	18,09	327,21	618,25	592,82	643,5
Kondenzační komora	557,9	41,7	1736,8	541,1	514	608,3
UV 100 h	605,9	36,8	1353,3	600,2	544,6	641,9
Teplotní cykly	510,4	31,3	981,8	517,8	460,8	552,8
Povětrnostní vlivy	561,68	19,55	382,13	558,68	533,25	586,52

Základní statické parametry tažnosti – Plasty Mladeč ASA.

Plasty Mladeč ASA – Tažnost [%]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	14,975	1,29	1,665	15,114	13,324	16,43
UV 20 h	13,07	1,346	1,811	12,84	11,558	15,566
Výdrž na teplotě 60 °C	18,23	3,87	14,98	17,22	12,65	23,92
Kondenzační komora	13,973	0,473	0,224	14,051	13,413	14,531
UV 100 h	13,785	1,335	1,783	13,189	11,952	15,504
Teplotní cykly	18,9	3,28	10,76	18,61	15,32	23,84
Povětrnostní vlivy	15,038	2,204	4,858	15,223	12,665	19,16

Základní statické parametry tvrdosti – Plasty Mladeč ASA.

Plasty Mladeč ASA – Tvrdost [HShD]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	75,4	0,452	0,204	75,5	74,6	76,1
UV 20 h	77,23	1,723	2,969	77,9	73,2	79,2
Výdrž na teplotě 60 °C	73,66	0,182	0,033	73,6	73,5	73,9
Kondenzační komora	76,12	0,716	0,512	76	75,4	77,2
UV 100 h	77,11	1,865	3,477	77,05	74,4	79,5
Teplotní cykly	75,21	0,843	0,71	75,45	73,3	76,2
Povětrnostní vlivy	76,93	1,01	1,02	76,55	76	78,7

Základní statické parametry meze pevnosti v tahu – C-TECH ASA.

C-TECH ASA – Mez pevnosti v tahu [MPa]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	44,885	0,258	0,0666	44,917	44,462	45,224
UV 20 h	45,335	0,804	0,646	45,605	44,395	46,115
Výdrž na teplotě 60 °C	44,674	0,508	0,258	44,772	43,638	45,178
Kondenzační komora	44,371	0,442	0,195	44,253	43,911	45,218
UV 100 h	44,156	0,211	0,0445	44,194	43,766	44,443
Teplotní cykly	45,676	0,191	0,0363	45,747	45,393	45,949
Povětrnostní vlivy	46,321	0,388	0,151	46,428	45,559	46,711

Základní statické parametry modulu pružnosti v tahu – C-TECH ASA.

C-TECH ASA – Modul pružnosti v tahu [MPa]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	540,66	16,97	288,06	544,84	510,39	560,14
UV 20 h	555,4	24,97	623,69	554,63	518,19	587,41
Výdrž na teplotě 60 °C	634,3	41,2	1695,6	629,3	589,9	679,9
Kondenzační komora	625,66	21,66	469,02	628,42	592,93	664,03
UV 100 h	595,59	19,94	397,51	593,89	567,73	623,23
Teplotní cykly	488,3	39,9	1588,3	491,8	411,6	532,6
Povětrnostní vlivy	559,11	23,68	560,66	568,79	517,17	588,96

Základní statické parametry tažnosti – C-TECH ASA.

C-TECH ASA – Tažnost [%]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	18,841	1,411	1,991	18,667	17,077	21,147
UV 20 h	11,978	2,162	4,675	10,932	9,383	14,82
Výdrž na teplotě 60 °C	10,754	1,305	1,702	10,585	8,465	12,624
Kondenzační komora	10,969	1,192	1,42	11,132	8,619	12,183
UV 100 h	18,412	2,201	4,843	17,952	14,969	21,92
Teplotní cykly	19,02	3,41	11,6	18,48	13,65	23,05
Povětrnostní vlivy	16,906	1,234	1,522	16,918	15,075	18,433

Základní statické parametry tvrdosti – C-TECH ASA.

C-TECH ASA – Tvrdost [HShD]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	74,45	0,615	0,378	74,5	73,5	75,4
UV 20 h	77,26	1,334	1,78	77,45	74,8	79
Výdrž na teplotě 60 °C	73,56	0,532	0,283	73,5	72,8	74,2
Kondenzační komora	75,3	0,892	0,795	75,3	74,1	76,3
UV 100 h	76,68	0,941	0,886	77	75,4	77,8
Teplotní cykly	73,82	1,208	1,46	73,95	71,7	76,1
Povětrnostní vlivy	75,65	0,428	0,183	75,6	75	76,4

Základní statické parametry meze pevnosti v tahu – Devil Design ASA.

Devil Design ASA – Mez pevnosti v tahu [MPa]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	45,282	0,343	0,118	45,161	44,885	45,823
UV 20 h	44,99	0,22	0,0486	44,95	44,769	45,418
Výdrž na teplotě 60 °C	45,822	0,402	0,162	45,922	45,155	46,195
Kondenzační komora	45,356	0,65	0,422	45,411	44,399	46,178
UV 100 h	43,975	0,695	0,483	44,184	42,632	44,625
Teplotní cykly	45,873	0,857	0,734	46,124	44,662	46,789
Povětrnostní vlivy	46,274	0,454	0,206	46,273	45,56	46,865

Základní statické parametry modulu pružnosti v tahu – Devil Design ASA.

Devil Design ASA – Modul pružnosti v tahu [MPa]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	559,41	14,75	217,46	557,27	534,42	583,9
UV 20 h	537,61	13,85	191,89	536,64	520,59	561,3
Výdrž na teplotě 60 °C	653,52	14,13	199,61	652,98	629,44	668,89
Kondenzační komora	592,9	47,2	2228,7	589,6	534	658,8
UV 100 h	565,5	7,22	52,16	567,93	554,98	571,15
Teplotní cykly	506,55	18,87	356,14	506,85	483,78	538,76
Povětrnostní vlivy	518,1	29,8	885,5	517,7	473,7	552,4

Základní statické parametry tažnosti – Devil Design ASA.

Devil Design ASA – Tažnost [%]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	11,529	1,204	1,449	11,439	9,701	13,628
UV 20 h	17,3	2,82	7,93	16,56	13,93	21,65
Výdrž na teplotě 60 °C	12,331	0,941	0,886	12,418	11,129	13,415
Kondenzační komora	12,116	0,827	0,683	12,251	10,99	13,227
UV 100 h	19,05	6,79	46,11	18,87	7,31	28,22
Teplotní cykly	14,108	2,492	6,211	13,809	11,206	19,037
Povětrnostní vlivy	13,854	2,287	5,232	13,57	11,045	17,698

Základní statické parametry tvrdosti – Devil Design ASA.

Devil Design ASA – Tvrdost [HShD]						
Sada vzorků	Parametry					
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Medián	Minimum	Maximum
Referenční sada	75,76	0,885	0,783	75,7	74,6	77,1
UV 20 h	76,41	0,972	0,945	76,5	74,6	77,8
Výdrž na teplotě 60 °C	74,84	1,106	1,223	74,8	73,9	76,6
Kondenzační komora	75,78	0,844	0,712	75,9	74,8	77
UV 100 h	76,63	1,072	1,149	76,2	75,4	78,1
Teplotní cykly	75,78	1,638	2,682	75,55	73,5	77,8
Povětrnostní vlivy	76,44	0,992	0,985	76,3	75	77,8